



**Tiago Manuel  
Rodrigues da Silva**

**Optimização do processo de refrigeração  
do pão para produção de tostas**



**Tiago Manuel  
Rodrigues da Silva**

**Optimização do processo de refrigeração do  
pão para produção de tostas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Nelson Martins, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Aos meus pais, pelo apoio  
À minha namorada, pela dedicação

## **O júri**

Presidente

Professor Doutor José Paulo Oliveira Santos  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente

Professora Doutora Ângela Maria Esteves da Silva  
Professora auxiliar da Universidade Lusíada

Orientador

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Co-Orientador

Doutor António João de Melo Martins de Araújo  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

## **Agradecimentos**

O presente trabalho resulta do meu esforço pessoal, em que a colaboração que me foi prestada assumiu um papel importante, por isso, gostaria de aqui expressar o meu reconhecimento e sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a realizar este objetivo pessoal.

Assim, começaria por agradecer ao Professor Doutor Nelson Martins e ao Professor António Araújo, pela partilha de conhecimentos, pela sua amizade, dedicação e disponibilidade, pelo auxílio prestado na utilização do programa ANSYS CFX.

À empresa DIATOSTA SA e a todos os seus colaboradores pelo incentivo e apoio dado durante a elaboração deste trabalho. Em especial ao Eng. Miguel Lameiro pela disponibilidade de todos os dados e ferramentas que sempre me facultou.

A todos os meus amigos pelo incentivo e preocupação ao longo da realização deste trabalho.

À minha Família, em especial aos meus pais, à minha irmã, pela forma como me acompanharam e ajudaram para a conclusão de mais uma etapa da minha formação.

Finalmente, um agradecimento muito especial à minha namorada Cláudia Amaral, pelo seu carinho e amizade, paciência e incondicional apoio que sempre demonstrou. Muito obrigado pelas conversas e palavras de coragem nos momentos menos bons, bem como a força transmitida.

A todos, o meu OBRIGADO

**Palavras-chave**

Câmara de refrigeração; Pão; Refrigeração; Simulação numérica; Temperatura

**Resumo**

O aumento do consumo energético a nível mundial tem levado cada vez mais ao uso de novas ferramentas e novas soluções que visam melhorar a eficiência energética de equipamentos e instalações industriais.

A criação de uma câmara de refrigeração, por norma, é feita de acordo com as dimensões e forma dos produtos que são introduzidos no seu interior. Não existem contudo estudos no qual aprofundem a forma de como os produtos devem ser introduzidos no seu interior para se obter uma refrigeração mais eficiente com os recursos disponíveis.

Neste trabalho foram realizados estudos numéricos de forma a melhorar-se o processo de refrigeração do pão.

Pretendia-se obter resultados que aumentassem a eficiência do processo de refrigeração do pão de forma a diminuir o seu tempo de armazenamento dentro da câmara de refrigeração. Estes resultados tinham que ser obtidos através de soluções de fácil implementação sem que haja modificações na instalação propriamente dita.

Após a definição de um projecto base realizaram-se vários estudos que foram comparados entre si. Dos resultados apurados resultaram conclusões importantes acerca da forma de armazenamento do pão, da introdução do ar na câmara de refrigeração e as suas implicações no desempenho da câmara.

Foram apresentadas 3 propostas. Nessas propostas obtiveram-se melhorias entre os 3% e os 14%. Todas são exequíveis e de fácil implementação, permitindo reduzir o tempo de refrigeração de 6 horas para aproximadamente 5 horas e 15 minutos.

**Keywords**

Bread; Numerical simulation; Refrigeration; Refrigeration chamber; Temperature

**Resumo**

The increase in the World's energy consumption has promoted the use of new tools and solutions to improve the energetic efficiency of equipments and industrial installations.

The creation of a refrigeration chamber is carried out, by norm, in compliance with the type of products that are placed in. At the moment, there are not many studies showing how one should introduce the products in the refrigeration chamber to get more efficient refrigeration with the available resources.

In the present work, numerical studies have been carried in order to improve the process of bread refrigeration. With this study, it was intended to get results that increased the efficiency of the process of bread refrigeration in order to diminish its time inside the refrigeration chamber.

These results were obtained by means of simple implementation solutions and without significant modifications in the installation itself. Important conclusions have been obtained, concerning the method of bread storage, about the input of air in the refrigeration chamber, and its implications in the performance of the chamber.

Finally, three solutions have been presented, resulting in improvements between 3% to 14%. All proposed solutions can be achieved by simple techniques, allowing the time of bread refrigeration to be reduced from a total of 6 hours to about 5 hours and 15 minutes.

## Índice Geral

<b>ÍNDICE GERAL .....</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. O PROBLEMA EM ESTUDO.....	1
1.3. OBJECTIVOS.....	2
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	2
1.5. CONTRIBUIÇÃO DA TESE.....	2
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	7
2.2. REFRIGERAÇÃO DO PÃO.....	7
2.3. OPTIMIZAÇÃO DE UM SECADOR DE BACALHAU .....	8
2.4. ESTUDO DE UMA CABINE DE CHUVEIRO PARA SECAGEM DE PESSOAS.....	8
2.5. DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PARA UM FORNO DE COZEDURA DE PÃO.....	9
2.6. PROCESSOS E MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTARES.....	9
2.7. CONCEPÇÃO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	11
2.7.1. <i>Constituição de uma câmara de refrigeração</i> .....	11
2.7.2. <i>Descrição do processo de refrigeração</i> .....	12
2.7.3. <i>Fluido refrigerante</i> .....	13
<b>CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO.....</b>	<b>17</b>
3.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO .....	17
3.1.1. <i>Descrição da empresa</i> .....	17
3.1.2. <i>Tipos de produtos</i> .....	18
3.2. PROCESSO DE ARREFECIMENTO DO PÃO.....	19
3.2.1. <i>Introdução</i> .....	19
3.2.2. <i>Descrição do problema</i> .....	19
3.3. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	19



<b>CAPÍTULO 4 – DEFINIÇÃO DO PROJECTO BASE .....</b>	<b>23</b>
4.1. DESCRIÇÃO DA GERAL DA INSTALAÇÃO .....	23
4.2. A CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO .....	23
4.2.1. <i>Dimensões</i> .....	24
4.2.2. <i>Evaporadores</i> .....	24
4.2.3. <i>Entrada do ar</i> .....	24
4.2.4. <i>Temperaturas</i> .....	25
4.3. O PÃO DE FORMA.....	27
4.3.1. <i>Características geométricas</i> .....	27
4.3.2. <i>Características físico-químicas</i> .....	27
4.3.3. <i>Condições de Armazenamento</i> .....	28
4.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	28
<b>CAPÍTULO 5 – MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....</b>	<b>31</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	31
5.2. SOLIDWORKS.....	31
5.3. ANSYS 12 .....	31
5.4. SIMPLIFICAÇÕES CONSIDERADAS .....	32
5.5. MODELAÇÃO .....	34
5.5.1. <i>Câmara de refrigeração</i> .....	34
5.5.2. <i>Pão e “pão simples”</i> .....	35
5.5.3. <i>Carrinho de “pão simples”</i> .....	36
5.5.4. <i>Antecâmara</i> .....	36
5.6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	38
5.6.1. <i>Tipo de malha</i> .....	38
5.6.2. <i>Estudo de dependência de malha</i> .....	39
5.6.3. <i>Validação experimental</i> .....	39
5.7. DEFINIÇÃO DOS ESTUDOS VARIANTES AO PROJECTO BASE .....	41
5.7.1. <i>Estudo 2, 3, 4 e 6</i> .....	41
5.7.2. <i>Estudo 5</i> .....	44
5.7.3. <i>Estudo 7</i> .....	45
• <i>Dados do ar de entrada na antecâmara</i> .....	45
5.7.4. <i>Definições impostas em cada variante</i> .....	46
5.8. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	47

<b>CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
6.1. RESULTADOS OBTIDOS .....	51
6.1.1. <i>Estudo 2</i> .....	52
6.1.2. <i>Estudo 3</i> .....	53
6.1.3. <i>Estudo 4</i> .....	54
6.1.4. <i>Estudo 5</i> .....	55
6.1.5. <i>Estudo 6</i> .....	55
6.1.6. <i>Estudo 7</i> .....	56
6.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS ESTUDOS .....	57
6.2.1. <i>Comparação entre os resultados do estudo 2</i> .....	57
6.2.2. <i>Comparação entre os resultados do estudo 3</i> .....	59
6.2.3. <i>Comparação entre os resultados do estudo 4</i> .....	61
6.2.4. <i>Comparação entre os resultados do estudo 5</i> .....	63
6.2.5. <i>Comparação entre os resultados do estudo 6</i> .....	65
6.2.6. <i>Comparações diversas</i> .....	67
6.3. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	68
<b>CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>73</b>
7.1. INTRODUÇÃO .....	73
7.2. SOLUÇÕES PROPOSTAS .....	73
7.3. ANÁLISE ECONÓMICA.....	74
7.4. CONCLUSÕES .....	75
7.5. TRABALHOS FUTUROS .....	77
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>85</b>
8.1. ANEXO A.....	85
8.1.1. <i>Câmara de refrigeração</i> .....	85
8.1.2. <i>Carrinho de armazenamento do pão</i> .....	85
8.1.3. <i>Tabuleiro</i> .....	86
8.1.4. <i>Pão de forma</i> .....	86
8.1.5. <i>Mini pão</i> .....	87
8.1.6. <i>Evaporador (Centauro - Modelo DD-746)</i> .....	87
8.2. ANEXO B.....	89
8.3. ANEXO C.....	99
8.4. ANEXO D .....	101
8.4.1. <i>Estudo 2</i> .....	101

8.4.2.	<i>Estudo 3</i> .....	102
8.4.3.	<i>Estudo 4</i> .....	104
8.4.4.	<i>Estudo 5</i> .....	105
8.4.5.	<i>Estudo 6</i> .....	107
8.4.6.	<i>Estudo 7</i> .....	108
8.5.	ANEXO E .....	109
8.6.	ANEXO F .....	117

## Índice de figuras

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA MUNDIAL [1] .....	1
FIGURA 2 – COMPORTAMENTO INTERNO DA HUMIDADE NO PÃO NUMA REFRIGERAÇÃO RÁPIDA [2] .....	7
FIGURA 3 – COMPORTAMENTO INTERNO DA HUMIDADE NO PÃO NUMA REFRIGERAÇÃO CONTROLADA [2] .....	7
FIGURA 4 – CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO DE ALGUNS PRODUTOS [6] .....	11
FIGURA 5 – MÓDULOS DE UMA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO [6] .....	12
FIGURA 6 – CONSTITUIÇÃO DA PAREDE DE UMA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO [6] .....	12
FIGURA 7 – CICLO DE REFRIGERAÇÃO [7] .....	12
FIGURA 8 – FLUIDOS OPERANTES [6] .....	14
FIGURA 9 – DIMENSÃO DO PÃO DE FORMA .....	18
FIGURA 10 – PRODUTOS QUE DERIVAM DO PÃO DE FORMA [10] .....	18
FIGURA 11 – DIMENSÃO DO MINI PÃO DE FORMA .....	18
FIGURA 12 – PRODUTOS QUE DERIVAM DO MINI PÃO DE FORMA [10] .....	18
FIGURA 13 – POSICIONAMENTO DO CARRINHO DE PÃO DENTRO DA CÂMARA .....	23
FIGURA 14 – CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO COM AS MEDIDAS INTERIORES .....	24
FIGURA 15 – IMAGEM DO EVAPORADOR .....	24
FIGURA 16 - EVAPORADORES NUMERADOS .....	25
FIGURA 17 – COMPARAÇÃO DOS DADOS REGISTADOS NO CONTROLO DA REFRIGERAÇÃO COM OS DO “DATA LOGGER” .....	26
FIGURA 18 – METADE DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO COM O PLANO DE SIMETRIA .....	32
FIGURA 19 – TABULEIRO COM 10 PÃES DE FORMA .....	33
FIGURA 20 – “PÃO SIMPLES” .....	33
FIGURA 21 – CARRINHO DE ARMAZENAMENTO COMPLETO .....	33
FIGURA 22 – CARRINHO DE “PÃO SIMPLES” .....	33
FIGURA 23 – METADE DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO .....	34
FIGURA 24 – METADE DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO COM A ENTRADA DE AR INFERIOR .....	35
FIGURA 25 – PÃO DE FORMA .....	35
FIGURA 26 – “PÃO SIMPLES” .....	35
FIGURA 27 – CARRINHO DE “PÃO SIMPLES” .....	36
FIGURA 28 – ANTECÂMARA MODELADA .....	37
FIGURA 29 – REGISTO DA TEMPERATURA DURANTE 8 HORA NO INTERIOR DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO .....	40
FIGURA 30 – ESTUDO 2.1 .....	41
FIGURA 31 – ESTUDO 2.2 .....	41
FIGURA 32 – ESTUDO 2.3 .....	41
FIGURA 33 – ESTUDO 3.1 .....	42
FIGURA 34 – ESTUDO 3.2 .....	42

FIGURA 35 – ESTUDO 3.3.....	42
FIGURA 36 – ESTUDO 4.1.....	42
FIGURA 37 – ESTUDO 4.2.....	43
FIGURA 38 – ESTUDO 4.3.....	43
FIGURA 39 – ESTUDO 6.1.....	43
FIGURA 40 – ESTUDO 6.2.....	43
FIGURA 41 – ESTUDO 6.3.....	43
FIGURA 42 – ESTUDO 5.1.....	44
FIGURA 43 – PÃO AMPLIADO NO ESTUDO 5.1 .....	44
FIGURA 44 – PÃO AMPLIADO NO ESTUDO 5.2 .....	44
FIGURA 45 – “PÃO SIMPLES” AMPLIADO NO ESTUDO 5.3 .....	44
FIGURA 46 – ESTUDO 7.....	45
FIGURA 47 – PONTOS CRIADOS NO ESTUDO 2.2.....	51
FIGURA 48 – PONTOS CRIADOS NO ESTUDO 2.3.....	51
FIGURA 49 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 2.2 .....	52
FIGURA 50 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 2.3 .....	52
FIGURA 51 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 3.2 .....	53
FIGURA 52 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 3.3 .....	53
FIGURA 53 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 4.2 .....	54
FIGURA 54 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 4.3 .....	54
FIGURA 55 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 6.2 .....	56
FIGURA 56 – PLANOS DE CORTE NO ESTUDO 6.3 .....	56
FIGURA 57 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 7.3 .....	57
FIGURA 58 – PERFIL DE VELOCIDADES NO ESTUDO 7.3.....	57
FIGURA 59 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 2.2 .....	58
FIGURA 60 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 2.3 .....	58
FIGURA 61 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 2.2, COM A MALHA VISÍVEL.....	58
FIGURA 62 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 2.3, COM A MALHA VISÍVEL.....	58
FIGURA 63 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 2.2 .....	59
FIGURA 64 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 2.3 .....	59
FIGURA 65 – COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS NO PONTO 2 ENTRE O ESTUDO 2.2 E O 2.3 .....	59
FIGURA 66 – CONTORNOS DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 3.2 .....	60
FIGURA 67 – CONTORNOS DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 3.3 .....	60
FIGURA 68 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 3.2, COM A MALHA VISÍVEL.....	60
FIGURA 69 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 3.3, COM A MALHA VISÍVEL.....	60
FIGURA 70 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 3.2 .....	60
FIGURA 71 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 3.3 .....	60

FIGURA 72 – DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE AR NO ESTUDO 3.2 .....	60
FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE AR NO ESTUDO 3.3 .....	60
FIGURA 74 – COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS NO PONTO 2 ENTRE O ESTUDO 3.2 E O 3.3 .....	61
FIGURA 75 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 4.2 .....	61
FIGURA 76 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 4.3 .....	61
FIGURA 77 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 4.2, COM A MALHA VISÍVEL .....	62
FIGURA 78 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 4.3, COM A MALHA VISÍVEL .....	62
FIGURA 79 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 4.2 .....	62
FIGURA 80 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 4.3 .....	62
FIGURA 81 – COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS NO PONTO 2 ENTRE O ESTUDO 4.2 E O 4.3 .....	62
FIGURA 82 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.1 .....	63
FIGURA 83 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.2 .....	63
FIGURA 84 – CONTORNOS DAS TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.3 .....	63
FIGURA 85 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.1, COM MALHA VISÍVEL .....	64
FIGURA 86 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.2, COM MALHA VISÍVEL .....	64
FIGURA 87 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS PARA O ESTUDO 5.3, COM A MALHA VISÍVEL .....	64
FIGURA 88 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.1 .....	64
FIGURA 89 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.2 .....	64
FIGURA 90 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 5.3 .....	65
FIGURA 91 – COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS NO PONTO 2 ENTRE O ESTUDO 5.1, 5.2 E 5.3 .....	65
FIGURA 92 – CONTORNOS DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 6.2 .....	66
FIGURA 93 – CONTORNOS DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 6.3 .....	66
FIGURA 94 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 6.2, COM MALHA VISÍVEL .....	66
FIGURA 95 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 6.3, COM MALHA VISÍVEL .....	66
FIGURA 96 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 6.2 .....	66
FIGURA 97 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO ESTUDO 6.3 .....	66
FIGURA 98 – COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS NO PONTO 2 ENTRE O ESTUDO 6.2 E 6.3 .....	67
FIGURA 99 – COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS NO PONTO 1 E 2 ENTRE O ESTUDO 3.2 E 6.3 .....	67
FIGURA 100 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	90
FIGURA 101 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	91
FIGURA 102 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	92
FIGURA 103 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	93
FIGURA 104 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	94
FIGURA 105 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	96
FIGURA 106 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE COM A REPOSIÇÃO DOS CARRINHOS DE PÃO .....	97

## Índice de gráficos

GRÁFICO 1 – REGISTO DA TEMPERATURA EM 8 HORAS NO INTERIOR DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO .....	40
GRÁFICO 2 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 2.1 .....	109
GRÁFICO 3 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 2.2 .....	109
GRÁFICO 4 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 2.3 .....	110
GRÁFICO 5 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 3.1 .....	110
GRÁFICO 6 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 3.2 .....	111
GRÁFICO 7 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 3.3 .....	111
GRÁFICO 8 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 4.1 .....	112
GRÁFICO 9 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 4.2 .....	112
GRÁFICO 10 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 4.3 .....	113
GRÁFICO 11 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 5.1 .....	113
GRÁFICO 12 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 5.2 .....	114
GRÁFICO 13 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 5.3 .....	114
GRÁFICO 14 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 6.1 .....	115
GRÁFICO 15 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 6.2 .....	115
GRÁFICO 16 – CONVERGÊNCIA DA MALHA NO ESTUDO 6.3 .....	116

## Índice de tabelas

TABELA 1 – DADOS RECOLHIDOS NO EVAPORADOR 1 E 3.....	25
TABELA 2 – TEMPERATURAS RECOLHIDAS ATRAVÉS DO “DATALOGGER” ENTRE 2009-03-25 E 2009-03-31.....	26
TABELA 3 – DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO ENTRE 2009-03-25 E 2009-03-31.....	26
TABELA 4 – MEDIDAS DO PÃO DE FORMA.....	27
TABELA 5 – PROPRIEDADES DO PÃO.....	27
TABELA 6 – PROPRIEDADES DE CADA TIPO DE MALHA [17] .....	38
TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE A MALHA CFX E FLUENT.....	39
TABELA 8 – DADOS DO AR DE ENTRADA DA ANTECÂMARA .....	45
TABELA 9 – RESULTADOS DO ESTUDO 2 .....	52
TABELA 10 – RESULTADOS DO ESTUDO 3 .....	53
TABELA 11 – RESULTADOS DO ESTUDO 4 .....	54
TABELA 12 – RESULTADOS DO ESTUDO 5 .....	55
TABELA 13 – RESULTADOS DO ESTUDO 6 .....	55
TABELA 14 – RESULTADOS DO ESTUDO 7 .....	56
TABELA 15 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS NO ESTUDO 2 .....	58
TABELA 16 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS NO ESTUDO 3 .....	59
TABELA 17 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS NO ESTUDO 4 .....	61
TABELA 18 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS NO ESTUDO 5 .....	63
TABELA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS NO ESTUDO 6 .....	65
TABELA 20 – COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS ENTRE O ESTUDO BASE E OS DOIS MELHORES OBTIDOS .....	67
TABELA 21 – COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS ENTRE O ESTUDO 3.3 E O 6.3 .....	68
TABELA 22 – COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS ENTRE O ESTUDO 3.2 E O 6.2 .....	68
TABELA 23 – ORÇAMENTO DAS PROPOSTAS APRESENTADAS .....	74
TABELA 24 – TEMPO DE RETORNO DE CADA PROPOSTA.....	74
TABELA 25 – CONCLUSÃO DOS ESTUDOS 2, 3, 4 E 6 .....	75
TABELA 26 - CONCLUSÃO DO ESTUDO 7.....	76
TABELA 27 - CONCLUSÕES DO ESTUDO 5 .....	76
TABELA 28 – DADOS DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO.....	85
TABELA 29 – DADOS DO CARRINHO DE ARMAZENAMENTO DO PÃO DE FORMA .....	85
TABELA 30 – DADOS DO TABULEIRO DO PÃO .....	86
TABELA 31 – DADOS DO PÃO.....	86
TABELA 32 – DADOS DO MINI PÃO .....	87
TABELA 33 – DADOS DA VENTONHA DO EVAPORADOR .....	87
TABELA 34 – DADOS FINAIS DO EVAPORADOR.....	87



TABELA 35 – REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 24-09-2009 .....	89
TABELA 36 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 25-09-2009 .....	90
TABELA 37 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 26-09-2009 .....	91
TABELA 38 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 27-09-2009 .....	92
TABELA 39 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 24-09-2009 .....	93
TABELA 40 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 29-09-2009 .....	94
TABELA 41 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 30-09-2009 .....	95
TABELA 42 - REGISTO DO CONTROLO DE REFRIGERAÇÃO DO DIA 31-09-2009 .....	96
TABELA 43 – NÚMERO DE CARRINHOS E ABERTURA DAS PORTAS POR DIA .....	97
TABELA 44 – VALORES MÉDIOS REGISTRADOS PELO “ <i>DATA LOGGER</i> ” ENTE 25-03-2009 A 30-03-2009 .....	99
TABELA 45 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 2.1.....	101
TABELA 46 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 2.2.....	101
TABELA 47 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 2.3.....	102
TABELA 48 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 3.1.....	102
TABELA 49 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 3.2.....	103
TABELA 50 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 3.3.....	103
TABELA 51 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 4.1.....	104
TABELA 52 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 4.2.....	104
TABELA 53 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 4.3.....	105
TABELA 54 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 5.1.....	105
TABELA 55 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 5.2.....	106
TABELA 56 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 5.3.....	106
TABELA 57 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 6.1.....	107
TABELA 58 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 6.2.....	107
TABELA 59 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 6.3.....	108
TABELA 60 – TEMPERATURAS OBTIDAS NO ESTUDO 7.....	108

## Nomenclatura

### Letras maiúsculas latinas

$A_{bi}$	Área da base interior da câmara de refrigeração
$A_s$	Área da superfície do pão de forma
$A_{sm}$	Área da superfície do mini pão de forma
$C_p$	Calor específico do carrinho de armazenamento de pão
$C_{p1}$	Calor específico do pão e mini pão de forma
$H.R._i$	Humidade relativa média no interior da câmara de refrigeração
$H.R._e$	Humidade relativa média no exterior da câmara de refrigeração
$K$	Condutividade térmica do carrinho de armazenamento de pão
$K_1$	Condutividade térmica do pão e mini pão de forma
$M$	Massa do carrinho de armazenamento de pão
$T_e$	Temperatura exterior da câmara de refrigeração
$T_i$	Temperatura média interior da câmara de refrigeração
$T_{i1}$	Temperatura interior do pão quando sai do forno
$T_{i2}$	Temperatura interior do pão quando entra na câmara de refrigeração
$T_{i3}$	Temperatura interior do pão quando sai da câmara de refrigeração
$T_{s1}$	Temperatura da superfície do pão quando sai do forno
$T_{s2}$	Temperatura da superfície do pão quando entra na câmara de refrigeração
$T_{s3}$	Temperatura da superfície do pão quando sai da câmara de refrigeração
$V$	Volume do pão de forma
$V_i$	Volume interior da câmara de refrigeração
$V_m$	Volume do mini pão de forma

### Letras minúsculas latinas

$a$	Altura do pão de forma
$a_m$	Altura do mini pão de forma
$a_{ce}$	Altura exterior do carrinho de armazenamento de pão
$a_{ct}$	Altura entre cada tabuleiro no carrinho de armazenamento de pão
$a_{imin}$	Altura interior mínima da câmara de refrigeração
$a_{imax}$	Altura interior máxima da câmara de refrigeração
$a_t$	Altura do tabuleiro
$a_{ti}$	Altura da rede interior do tabuleiro
$c$	Comprimento do pão de forma
$c_m$	Comprimento do mini pão de forma
$c_c$	Comprimento do perfil do carrinho do pão
$c_{ce}$	Comprimento exterior do carrinho de armazenamento de pão
$c_i$	Comprimento interior da câmara de refrigeração
$c_t$	Comprimento do tabuleiro
$c_{ti}$	Comprimento da rede interior do tabuleiro
$e_c$	Espessura do carrinho de armazenamento de pão
$h_{max}$	Tempo de armazenamento máximo no interior da câmara de refrigeração
$h_{min}$	Tempo de armazenamento mínimo no interior da câmara de refrigeração
$l$	Largura do pão de forma
$l_m$	Largura do mini pão de forma
$l_c$	Largura do perfil do carrinho de armazenamento de pão
$l_{ce}$	Largura exterior do carrinho de armazenamento de pão
$l_i$	Largura interior da câmara de refrigeração
$l_t$	Largura do tabuleiro
$l_{ti}$	Largura da rede interior do tabuleiro
$m$	Massa do tabuleiro
$m_1$	Massa do pão de forma quando sai do forno
$m_2$	Massa do pão de forma quando entra na câmara de refrigeração
$m_3$	Massa do pão de forma quando sai da câmara de refrigeração
$m_1$	Massa do mini pão de forma quando sai do forno
$m_2$	Massa do mini pão de forma quando entra na câmara de refrigeração

**Letras do alfabeto grego**

- $\alpha$  Difusividade térmica do carrinho de armazenamento de pão
- $\alpha_1$  Difusividade térmica do pão de forma
- $\rho$  Massa volúmica do carrinho de armazenamento de pão
- $\rho_1$  Massa volúmica do pão de forma quando sai do forno
- $\rho_2$  Massa volúmica do pão de forma quando entra na câmara de refrigeração
- $\rho_3$  Massa volúmica do pão de forma quando sai da câmara de refrigeração

# Capítulo 1

## Capítulo 1 – Introdução

### 1.1. Enquadramento

À medida que os países se desenvolvem o consumo energético de combustíveis fósseis aumentou imenso ao longo dos últimos anos.

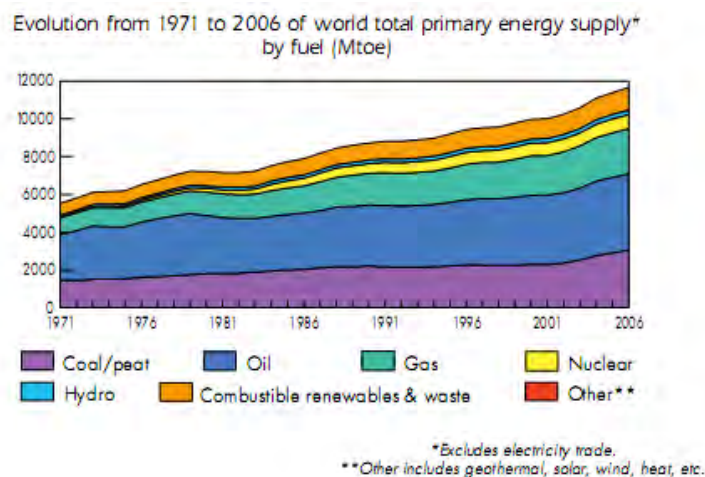


Figura 1 – Evolução do consumo de energia mundial [1]

É necessário que uma mentalidade mais agressiva na qual permita que haja estudos que visem melhorar e otimizar todos os processos consumidores de energia. Assim é necessário recorrer a novas formas de energia e aumentar a eficiência das instalações consumidoras de energia.

O processo de refrigeração é um processo intrínseco na produção de tostas. Numa linha de produção completa, em que existem as mais diversas etapas, optou-se por se enquadrar a tese num objectivo claro – otimizar o processo de refrigeração do pão para a produção de tostas. Com esta optimização será permitido baixar o consumo específico de energia das tostas produzidas. Assim, este processo será mais eficiente permitindo que se reduza a quantidade de energia consumida por produção de tostas.

### 1.2. O problema em estudo

O processo de fabrico de tostas passa por várias etapas sendo uma delas o processo de refrigeração do pão de forma. Esta etapa é demorada, cuja duração pode variar entre 6 a 8 horas, fazendo com que o resto da linha de produção esteja, em geral, dependente da etapa da refrigeração.

O pão de forma é armazenado em carrinhos os quais são inseridos dentro da câmara de refrigeração. Quando a câmara de refrigeração se encontra na sua capacidade máxima é necessário deixar os carrinhos de armazenamento do pão no seu exterior e parar a produção de tostas até que o pão se encontre à temperatura óptima para que o seu corte seja bem efectuado.

### **1.3. Objectivos**

Define-se como principal objectivo deste trabalho melhorar o processo de refrigeração do pão na produção de tostas. Nesta melhoria, não se pretende modificar o processo interno da produção de frio, mas sim encontrar conceitos e soluções inovadoras e de fácil implementação que permitam reduzir o tempo de refrigeração e deste modo o tempo de produção. Para cumprir este objectivo realizaram-se simulações numéricas com o programa ANSYS CFX. Pretendeu-se simular diversas soluções variando o posicionamento e espaçamento dos carrinhos de armazenamento do pão e também a forma de entrada do ar na câmara de refrigeração.

### **1.4. Estrutura da Tese**

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos que ilustram os dados adquiridos e a sequência dos estudos realizados. No presente capítulo é feita uma breve introdução do tema desenvolvido e são resumidos os principais objectivos.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica. É descrita a forma de armazenamento de produtos alimentares e a constituição geral de uma câmara de refrigeração.

No capítulo 3 é descrito o processo de produção do pão de forma para a produção de tostas. Nessa descrição é salientado o processo de refrigeração do pão e o problema associado a ele.

O capítulo 4 descreve a instalação definida para o estudo assim como os diversos componentes que interagem e fazem parte dela.

No capítulo 5 são apresentados os programas que foram usados para a realização dos estudos realizados. Apresenta-se a modelação e simulação dos diversos estudos efectuados e as condições de cada estudo.

O capítulo 6 apresenta todos os resultados obtidos e as principais comparações entre eles. Este capítulo serve de base para o capítulo 7 no qual são apresentadas soluções de optimização do problema em estudo com os custos associados e também a sugestão de trabalhos futuros.

O capítulo 7 incorpora as soluções de optimização do problema em estudo, com a sua análise económica. De seguida são descritas as principais conclusões resultantes dos estudos realizados e são mencionadas propostas de estudos futuros.

### **1.5. Contribuição da Tese**

A presente tese contribui para a optimização do processo de refrigeração do pão. Os estudos realizados confirmaram que é possível melhorar o processo de refrigeração do pão com o recurso a pequenos detalhes que por vezes se desprezam. Com este trabalho conseguiu-se uma redução de 10% a 14% do tempo de refrigeração do pão até à temperatura pretendida. Também se concluiu

que o processo de refrigeração pode ser melhorado com o uso de uma pré-refrigeração para permitir que a refrigeração não seja prejudicada ao serem introduzidos os produtos na câmara de refrigeração a uma temperatura desnecessariamente elevada.

Pretende-se ainda que este trabalho contribua para a disseminação das técnicas computacionais enquanto ferramenta de projecto e optimização no campo da engenharia, através da demonstração do seu potencial real nesse âmbito.



# Capítulo 2

## Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

### 2.1. Introdução

No processo de refrigeração do pão para a produção de tostas não foram encontrados muitos estudos de otimização com recurso a simulações numéricas em CFD. Contudo existem alguns estudos feitos com ferramentas de CFD, inclusive com o ANSYS CFX, incluindo aplicações com produtos alimentares, os quais foram úteis na realização deste trabalho.

### 2.2. Refrigeração do pão

O efeito da refrigeração no pão tendo em conta as condições de humidade e de velocidade de arrefecimento foi avaliado por *Alexandre Grenier e al.* [2]. O estudo foi feito com 4 temperaturas distintas entre os 5°C e os 20°C e foi observado que a taxa de arrefecimento do pão era maior na superfície do que no centro. Conclui-se que um arrefecimento demasiado rápido do pão provoca condensação de água no seu interior, ao invés do arrefecimento moderado que mantém pão mais seco. Os resultados obtidos sugerem que a transferência de massa pode modificar o aparente coeficiente de condutividade térmica do pão durante o seu arrefecimento.

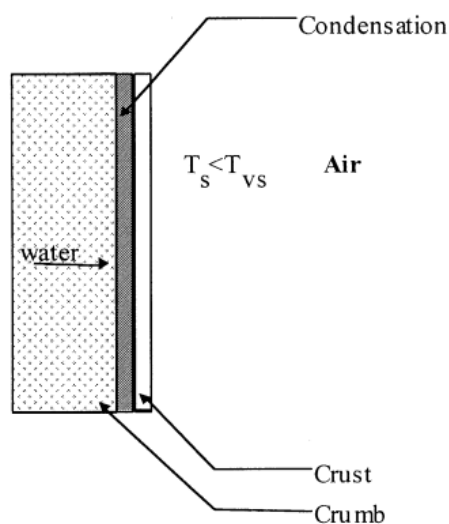


Figura 2 – Comportamento interno da humidade no pão numa refrigeração rápida [2]

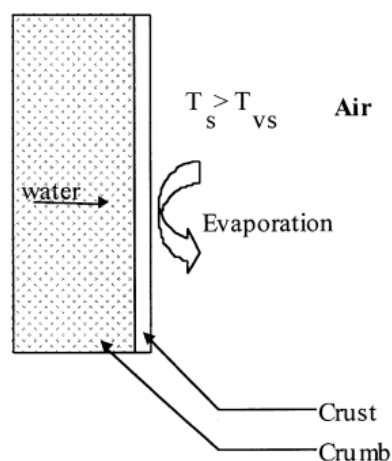


Figura 3 – Comportamento interno da humidade no pão numa refrigeração controlada [2]

### **2.3. Optimização de um secador de bacalhau**

O uso do CFD permite simular eficientemente diversos sistemas consumidores de energia, inclusive os secadores. *Flávio Lé e al.* [3] simulou e avaliou um secador com o objectivo de otimizar a secagem de bacalhau. A metodologia usada neste estudo foi feita de forma a validar o projecto simulado com o projecto real. Todo o processo de secagem foi revisto para que todas as variáveis necessárias a introduzir no programa de CFD fossem definidas.

Após a validação do projecto base, foram criados estudos com parâmetros diferentes com vista a encontrar soluções que optimizassem o projecto base e optimizassem o consumo de energia desta instalação de secagem.

Neste estudo pode-se concluir que a metodologia do trabalho a realizar é um ponto-chave do sucesso dos estudos com ferramentas de CFD. A comparação de diversos cenários permite soluções de optimização. A secagem do bacalhau foi optimizada permitindo validar os pressupostos feitos na ferramenta CFD.

### **2.4. Estudo de uma cabine de chuveiro para secagem de pessoas**

A domótica é actualmente um dos campos em grande expansão devido às suas potencialidades de optimização do consumo de energia em habitações domésticas e instalações comerciais. A casa do futuro é um programa de cooperação entre o Ministério Português e a Universidade de Aveiro, juntamente com o recurso de mais 12 empresas. Têm como objectivo implementar e desenvolver as mais diversas e futuristas soluções que permitam uma optimização do consumo de energia nas habitações. A simulação da secagem de pessoas após o uso de um chuveiro foi simulada por *Hugo Calisto et al.* [4] com o recurso a ferramentas de CFD. A metodologia do trabalho, conforme se verificou no trabalho anterior, volta a ser um dos aspectos mais importantes na realização de estudos de simulação numérica. Este trabalho foi realizado com base num secador para pessoas para ser implementado na casa do futuro.

Foi feito o levantamento de todos os dados necessários a ser introduzidos no programa de simulação e posteriormente este projecto foi validado. Após este estudo, foram realizados vários estudos alternativos de forma a optimizar a eficiência da secagem.

Foi avaliada a viabilidade do projecto tendo em conta o desempenho, o investimento, o uso eficaz da energia consumida e os níveis de conforto dados aos utilizadores do secador.

Neste estudo foi comparado a distribuição de temperaturas, o fluxo de humidade, a velocidade do ar de secagem e o índice de secagem.

Foram realizadas várias simulações, com temperaturas e humidade relativa diferentes, de forma a encontrar conclusões na escolha da cabine de acordo com os parâmetros comparados.

Conclui-se que a viabilidade do projecto depende da época em que é feita a secagem, mas de uma forma geral, pode-se concluir que os custos totais são contidos sem comprometer o conforto

do utilizador. O desempenho da secagem depende mais da humidade relativa do ar do secador do que da temperatura de secagem. Foi concluído que a humidade relativa do ar do secador não deve exceder os 40%.

## **2.5. Desenvolvimento de um controlador para um forno de cozedura de pão**

Na cozedura do pão predominam várias mudanças de fase. A qualidade final do pão cozido é influenciada pela desnaturação das proteínas, por reacções enzimáticas e reacções térmicas na superfície do pão. Frequentemente na cozedura do pão encontram-se controladores das temperaturas dos fornos pouco eficientes e imperfeitos. Para contornar este problema, *Wong et al.* [5] fez um estudo com uma ferramenta CFD no qual aplicou um modelo bidimensional com o objectivo de desenvolver um controlador com um maior desempenho, para um forno contínuo industrial.

No modelo de CFD foi incorporado o sistema de controlo e as funções definidas pelo utilizador. Através de sondas foram monitorizadas as temperaturas do forno em posições específicas para definir as condições térmicas das paredes do queimador de acordo com os dados recolhidos.

A simulação permitiu recolher todas as informações do fluxo de calor (temperatura, velocidade, pressão, etc.) e obter conclusões. O controlador responde de forma satisfatória a distúrbios e mudanças do ponto ajustado e a eliminação do pré-aquecimento inicial a 550 °K não afectaria significativamente a distribuição de temperaturas no pão à superfície. De forma a suprimir este pré-aquecimento, foi proposto, sob o controlador desenvolvido, uma zona do forno onde a superfície do pão se encontra com uma distribuição de temperaturas similar à que se encontra no pré-aquecimento. *Wong et al.* [5] afirma que a eliminação do pré-aquecimento reduz o tempo inicial de cozedura, conservando energia sem prejudicar a qualidade do pão.

## **2.6. Processos e métodos de refrigeração de produtos alimentares**

Para preservar e armazenar produtos alimentares é recorrente refrigerá-los ou congelá-los. A decisão entre congelar ou apenas refrigerar depende do tipo de produto e do tempo que se pretende armazenar o produto.

Os produtos “mortos” podem ser congelados, enquanto os produtos “vivos” são apenas refrigerados.

No caso da congelação a preservação dos alimentos depende de 4 parâmetros principais. A composição do produto, o cuidado na preparação, o método de congelação e o armazenamento posterior.

A refrigeração de um produto não altera significativamente a estrutura deste, o que não se observa no congelamento. Quando se congela um produto a estrutura molecular deste por vezes é alterada porque são criados cristais de gelo entre as células do produto. Após a sua descongelação o produto pode apresentar uma textura, forma e sabor diferente. Para que o congelamento

seja bem sucedido é recomendável a monitorização da temperatura e humidade relativa para que a qualidade final seja elevada.

Muitos produtos antes de serem refrigerados ou congelados têm que ser preparados para tal. Alguns produtos devem ser limpos, lavados e secos antes da sua congelação ou refrigeração, ao passo que outros são introduzidos húmidos.

Para produtos quentes, é aconselhável que haja uma pré-refrigeração antes de serem refrigerados ou congelados, para que não haja condensação no seu interior.

As embalagens que armazenam os produtos a serem refrigerados ou congelados têm que estar limpas e secas. Nas frutas e vegetais, as suas embalagens têm que conter furos que para que o calor libertado pela respiração deles possa ser realizado.

Alguns produtos não podem ser refrigerados juntamente com outros por libertarem odores que podem transmitir-se aos outros, é o caso do peixe e do limão.

Cada produto tem diferentes formas de armazenamento, como demonstram os exemplos apresentados na Figura 4.

<i>Products</i>	<i>Temperature</i>	<i>Humidity</i>	<i>Life</i>
Apples	1-4*	85-90	2-8 months
Bananas, green	12-14	90	10-20 days
ripe	14-16	90	5-10 days
Beer, barrel	2-12	65	3-6 months
Cabbage	0-1	95	3-5 weeks
Carrots, young	0-1	95	1-2 months
old	0-1	95	5-8 months
Celery	0-1	95	1-2 months
Cucumber	10-12	90-95	10-14 days
Dairy products, milk	0-1	-	2-4 months
cream	-23-(-28)	-	6-12 months
cheese	1-4	65-70	6-18 months
yoghurt			
Dried fruits	0-1	Low	6 months up
Eggs, shell	-1-0	80-85	5-6 months
Fish, wet	1-2	90-95	5-15 days
Fruit soft (berries)	0-1	90-95	5-7 days
Grapefruit	10-14	85-90	4-6 weeks
Grapes	0-1	90-95	2-5 months
Lemons, green	14-15	85-90	1-6 months
Lettuce	0-1	90-95	1-2 weeks
Meats, bacon	1-4	85	1-3 months
beef	-1-(+1)	85-90	1-6 weeks
ham, fresh	0-1	85-90	7-14 days
lamb, mutton	0-1	85-90	5-14 days
pork, fresh	0-1	85-90	3-7 days
poultry	-1-0	85-90	1 week
frozen	-12	90-95	2-8 months
frozen	-18	-	4-12 months
Melons	4-10†	85-90	1-4 weeks
Mushrooms	0	90	1-4 days
Onions	0-1	65-70	1-8 months
Oranges	0-9†	85-90	3-12 weeks
Pears	-1-(+1)*	90-95	2-6 months
Pineapples	7-10	90	2-4 weeks
Plums	0-1	85-90	2-8 weeks
Potatoes, new crop	10-12	85-95	3-6 weeks
main crop	1-3	90-95	6-10 months
Tomatoes, green	12-15	85-90	3-5 weeks
ripe	10	85-90	8-12 days
Wine unfortified	8-10	-	Indefinite

Figura 4 – Condições de armazenamento de alguns produtos [6]

## 2.7. Concepção de sistemas de refrigeração

### 2.7.1. Constituição de uma câmara de refrigeração

A câmara de refrigeração depende em tamanho e forma dos seguintes factores:

- Quantidade e variedade dos produtos a serem armazenados;
- Tempos de armazenamento;
- Temperaturas impostas;
- Tamanho e forma das embalagens de armazenamento do produto;
- Métodos de introdução dos produtos.

As câmaras de refrigeração são feitas em módulos, de materiais rígidos e homogêneos. Estes módulos são painéis do tipo “sandwich” e têm no seu interior, por norma, poliuretano que serve de isolante.



Figura 5 – Módulos de uma câmara de refrigeração [6]

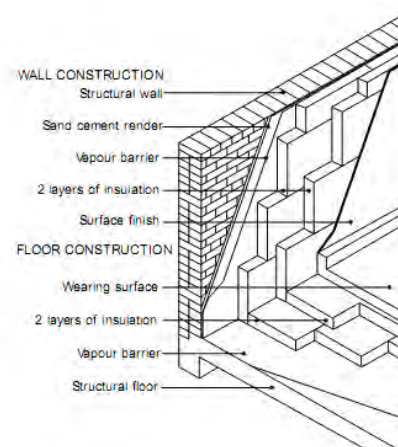


Figura 6 – Constituição da parede de uma câmara de refrigeração [6]

### 2.7.2. Descrição do processo de refrigeração

As instalações de produção de frio são constituídas por 4 elementos principais e regem-se pelo princípio do ciclo de Carnot.

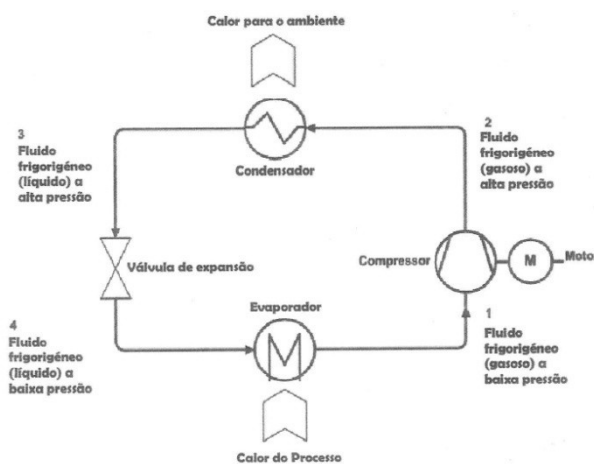


Figura 7 – Ciclo de refrigeração [7]

Com o auxílio da referência [7] é explicado de seguida a função dos 4 principais constituintes de uma instalação de frio:

1. Evaporador – Recebe o fluido a baixa pressão e temperatura. Absorve calor latente fazendo com que o fluido se torne gás seco a uma temperatura muito baixa, seguindo para o compressor;

2. Compressor – Recebe o fluido vindo do evaporador em baixa pressão. Aumenta a pressão do fluido refrigerante e consequentemente a sua temperatura. O fluido é enviado para o condensador. Existem 3 tipos principais de compressores: alternativos ou de pistões, rotativos ou de parafuso e centrífugos.
3. Condensador – Recebe o fluido refrigerante do compressor a alta pressão e no estado gasoso. Retira-lhe calor latente fazendo com que o fluido se condense tornando-se líquido a pressão constante.
4. Válvula de expansão – Garante que o fluxo do fluido refrigerante sob a forma líquida a alta pressão se processa do condensador para o evaporador. O fluido ao passar pelo orifício da válvula baixa a pressão e consequentemente o seu ponto de ebulição. A esta pressão e temperatura, o fluido refrigerante começa a vaporizar-se a uma temperatura mais baixa o que origina o “frio” no interior das tubagens do seu permutador.

Para além destes componentes, as instalações são ainda constituídas por diversos componentes, tais como as tubagens, termóstatos, humidificadores, botões de pressão, válvulas de pressão, etc.

### **2.7.3. Fluido refrigerante**

Existem vários fluidos refrigerantes usados nas instalações de produção de frio. Quando uma instalação é feita o fluido operante é escolhido de acordo com as seguintes características ([7] e [6]):

- Calor latente de evaporação elevado;
- Temperatura e ponto crítico acima dos limites de funcionamento da instalação;
- Compatível com o óleo lubrificante e os diversos componentes da instalação;
- Densidade elevada;
- Pressões de funcionamento razoáveis;
- Baixo custo;
- Não corrosivo, não inflamável e não tóxico;
- Ecológico, deve ter reduzido ODP (potencial de destruição da camada de ozono) e GWP (potencial de aquecimento global ou de efeito de estufa);
- De fácil detecção em estudo de fuga.

Muitos dos fluidos operantes actuais vieram substituir outros que não eram tão “amigos” do ambiente, conforme se pode observar na Figura 8.



<i>Refrigerant type/no.</i>	<i>Substitute for</i>	<i>ODP</i>	<i>GWP</i>	<i>Cond. temp. at 26 bar (°C)</i>	<i>Sat. temp. at 1 bar abs °C</i>
<b>HCFC (short term)</b>					
R22	R502, R12	0.05	1700	63	-41
<b>HFCFC/HFC service-blends (transitional alternatives)</b>					
R401A	R12	0.03	1080	80	-33
R401B	R12	0.035	1190	77	-35
R409A	R12	0.05	1440	75	-34
<b>HFC-Chlorine free (long-term alternative)</b>					
R134A	R12, R22	0	1300	80	-26
<b>HFC-Chlorine free-blends-(long-term alternatives)</b>					
R404A	R502	0	3750	55	-47
R407A	R502	0	1920	56	-46
R407B	R502	0	2560	53	-48
R407C	R22	0	1610	58	-44
ISCEON 59	R22	0	2120	68	-43
R410A	R22, R13B1	0	1890	43	-51
R411B	R12, R22, R502	0.045	1602	65	-42
<b>Halogen free (long-term alternatives)</b>					
R717 ammonia	R22, R502	0	0	60	-33
R600a isobutane	R114	0	3	114	-12
R290 propane	R12, R22, R502	0	3	70	-42
R1270 propylene	R12, R22, R502	0	3	61	-48

Figura 8 – Fluidos operantes [6]

Actualmente, os fluidos de refrigeração mais utilizados são o R-717, R-134<sup>a</sup>, R-407c, R123 e o R22.

# Capítulo 3

## Capítulo 3 – Descrição do processo produtivo

### 3.1. Descrição do processo produtivo

No âmbito do protocolo GALP ENERGIA/ UNIVERSIDADE DE AVEIRO, foi realizado um estágio na empresa DIATOSTA, SA. Com este estágio foi permitido a recolha de dados necessários para fundamentar a realização dos estudos pretendidos. Através dos dados recolhidos houve o cálculo de outros dados necessários para a realização do estudo através das referências ([8]; [9]).

O processo de fabrico de tostas é realizado de uma forma quase autónoma e com uma linha de produção bem estruturada. A intervenção humana directa só existe onde é mesmo indispensável, sendo grande parte do processo automatizado.

Em síntese, este processo é feito da seguinte forma:

1. É feita a massa, através da pesagem automática dos diversos ingredientes, necessários para o tipo de tostas que se pretende obter;
2. A massa obtida é colocada na divisora que corta, pesa e coloca a massa em pequenos moldes;
3. Posteriormente, os moldes são colocados numa câmara de fermentação e de seguida são reencaminhados por tapetes rolantes para fornos de cozedura;
4. O pão de forma obtido é desenformado e armazenado em carrinhos;
5. Estes carrinhos são armazenados na câmara de refrigeração e após a sua refrigeração são reencaminhados para a máquina de corte;
6. Na máquina de corte o pão de forma é cortado de forma igual por tamanho e peso, passando num forno de tostagem contínuo, obtendo-se o produto final que são as tostas;
7. As tostas são armazenadas em saco ou em embalagens organizadas que são distribuídas posteriormente.

#### 3.1.1. Descrição da empresa

A DIATOSTA iniciou a sua actividade em Agosto de 1977, é líder de mercado em Portugal desde 1985 em vendas e fabrico de tostas, sendo uma das empresas no top 10 mundial enquanto fabricante de tostas [10].

A DIATOSTA investiu nos últimos 5 anos, mais de 25 milhões de euros, no desenvolvimento de produtos, políticas de qualidade, sofisticação do layout produtivo, formação de recursos humanos, bem como uma nova fábrica e centro de distribuição [10].

Actualmente, a DIATOSTA exporta para diversos países mais de metade da sua capacidade produtiva.

A empresa possui 2 linhas de produção completas e independentes, designadas por pólo 1 e 2.

### 3.1.2. Tipos de produtos

Existem vários tipos de tostas que provêm de dois tipos geométricos diferentes de pão de forma, variando somente a massa consoante os ingredientes.

As tostas “*minigrill*” provêm do mini pão de forma e as tostas “*tostagrill*” provêm do pão de forma “normal”.

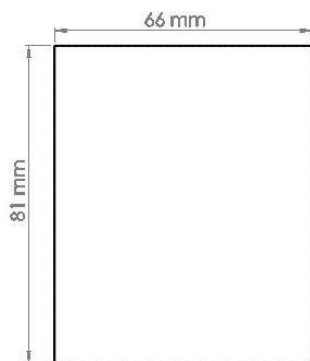


Figura 9 – Dimensão do pão de forma

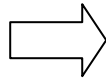


Figura 10 – Produtos que derivam do pão de forma [10]

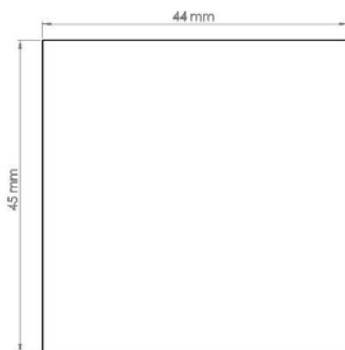


Figura 11 – Dimensão do mini pão de forma

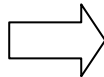


Figura 12 – Produtos que derivam do mini pão de forma [10]

## **3.2. Processo de arrefecimento do pão**

### **3.2.1. Introdução**

Para a produção de tostas, o pão de forma necessita de ser arrefecido. Este arrefecimento é necessário para que seja permitido o corte do pão de uma forma eficaz, fácil e com as medidas estipuladas. O pão de forma é arrefecido para aproximadamente 13°C durante 6 a 8 horas. Após este período sai da câmara de refrigeração e é introduzido na máquina de corte.

### **3.2.2. Descrição do problema**

A linha de produção encontra-se dependente refrigeração do pão porque a câmara de refrigeração não tem a capacidade de refrigerar o pão de forma no tempo pretendido.

Após o pão de forma sair do forno de cozedura é armazenado num carrinho e este é colocado à frente da câmara de refrigeração por dois motivos:

- É necessário que o pão arrefeça até aproximadamente à temperatura mínima<sup>1</sup> possível;
- Não existe disponibilidade de espaço dentro da câmara de refrigeração para armazenar mais carrinhos de pão, porque o pão que se encontra no seu interior ainda não está à temperatura exigida.

Assim a linha de produção tem de parar, originando um abrandamento na produção, contribuindo com prejuízos no processo de fabrico das tostas.

## **3.3. Conclusões do capítulo**

A produção de tostas é feita em várias etapas, em que uma delas é o processo de refrigeração do pão. Esse processo necessita de ser otimizado porque a quantidade de tostas produzidas está influenciada pela quantidade de pão de forma que é arrefecido na câmara de refrigeração. Devido à refrigeração do pão de forma não ser muito eficiente, é necessário parar a linha de produção para que o pão do interior câmara de refrigeração fique à temperatura desejada.

---

<sup>1</sup> Considere-se a temperatura mínima possível como a temperatura dentro da unidade fabril.

# Capítulo 4

## Capítulo 4 – Definição do projecto base

### 4.1. Descrição da geral da instalação

No exterior da câmara de refrigeração existe um painel digital, o qual permite definir qual a temperatura e humidade relativa que se deseja no interior da câmara. Este painel também fornece o registo da temperatura e humidade relativa que se encontra nesse instante dentro da câmara de refrigeração. A câmara de refrigeração é composta por 7 evaporadores, 4 compressores, suas tubagens e componentes. Os carrinhos de pão de forma são armazenados no interior da câmara aleatoriamente, sem espaço entre eles, tentando aproveitar ao máximo a capacidade de armazenamento que a câmara dispõe. O seu posicionamento, por norma, é feito com o comprimento do carrinho perpendicularmente com o comprimento da câmara de refrigeração, como se pode observar na Figura 13.

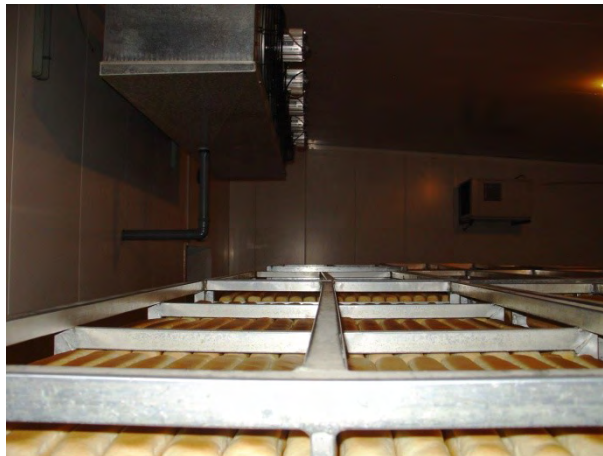


Figura 13 – Posicionamento do carrinho de pão dentro da câmara

### 4.2. A Câmara de refrigeração

A câmara de refrigeração possui duas portas, uma de entrada e outra de saída dos carrinhos de pão. Tem um volume total de 314 m<sup>3</sup> permitindo que sejam armazenados no máximo aproximadamente 50 carrinhos de pão. No seu interior existem 7 evaporadores com 5 ventoinhas cada um.

As duas portas são abertas no mínimo 100 vezes por dia. Por hora são retirados em média 5 carrinhos de pão da câmara de refrigeração e de seguida a porta de entrada é aberta para a reposição dos mesmos. Assim, no total de vezes que as portas são abertas, apenas 15% do número total pertence à porta de entrada. É de salientar que não existe qualquer sistema de retenção do ar exterior quando as portas de câmara são abertas.

#### 4.2.1. Dimensões

A câmara de refrigeração tem aproximadamente as medidas internas de 16,1 m de comprimento, 6,2 m de largura e a sua altura varia entre os 3 m e os 3,3 m (Figura 14).

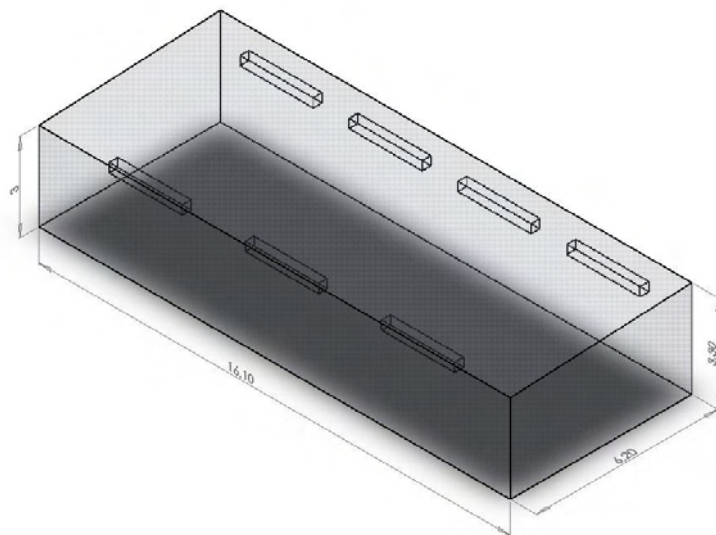


Figura 14 – Câmara de refrigeração com as medidas interiores

#### 4.2.2. Evaporadores

Os 7 evaporadores que existem no interior da câmara de refrigeração possuem 5 ventoinhas com potência unitária de 120W, perfazendo uma potência total de 4,2 kW.



Figura 15 – Imagem do evaporador

As dimensões exteriores de cada evaporador são de 2,5 m de comprimento, com 0,3 m de largura e altura.

#### 4.2.3. Entrada do ar

Com a temperatura interna da câmara de refrigeração definida para 6°C, o ar é injectado através dos evaporadores à temperatura média de 7,2°C, com um caudal mássico médio de ar de 13,7 kg/s.



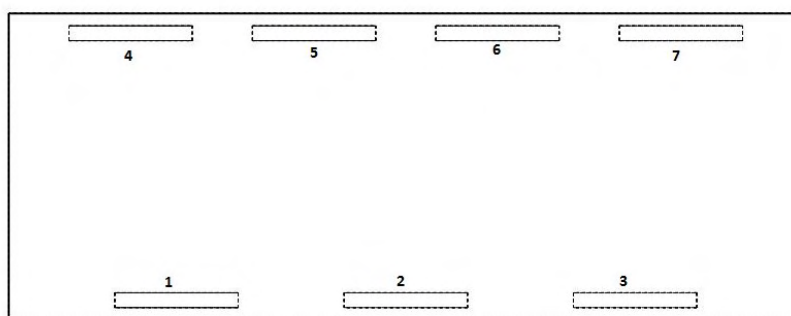


Figura 16 - Evaporadores numerados

Tabela 1 – Dados recolhidos no evaporador 1 e 3

	Entrada do ar						
	Temperatura [°C]	Temperatura média [°C]	Velocidade máxima [m/s]	Velocidade mínima [m/s]	Velocidade média [m/s]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Caudal mássico [kg/s]
1	6,4	7,2	9,6	2,3	6,0	1,2538	13,70
	6,1		9,7	3,0			
	6,3		10,9	2,4			
	6,5		9,5	2,4			
	6,3		10,2	2,4			
3	8,0		10,4	2,5			
	8,3		7,5	2,6			
	8,2		9,6	2,3			
	8,0		9,0	2,3			
	8,1		8,7	2,5			

Os dados recolhidos e calculados na Tabela 1 são relativos aos evaporadores 1 e 3 que foram numerados de acordo com a Figura 16.

#### 4.2.4. Temperaturas

Foram retirados os dados relativo à temperatura no interior da câmara, para o mesmo intervalo de tempo:

- Através do registo do painel da câmara de refrigeração, cada vez que é introduzido carrinho com pão armazenado (Tabela 3);
- Através de um “*datalogger*” (Testo 175-H2) (Tabela 2).

Tabela 2 – Temperaturas recolhidas através do “datalogger” entre 2009-03-25 e 2009-03-31

Temperatura média de todos os dados recolhidos [°C]:	7,4
Humidade relativa média [%]	87,7

Tabela 3 – Dados obtidos através do controlo de refrigeração entre 2009-03-25 e 2009-03-31

Dia	Temperatura média [°C]	Humidade relativa média [%]
25	11,08	82,62
26	9,67	80,25
27	8,46	82,31
28	8,90	84,20
29	9,00	69,00
30	9,00	81,33
31	9,67	80,20
Média	9,40	79,99

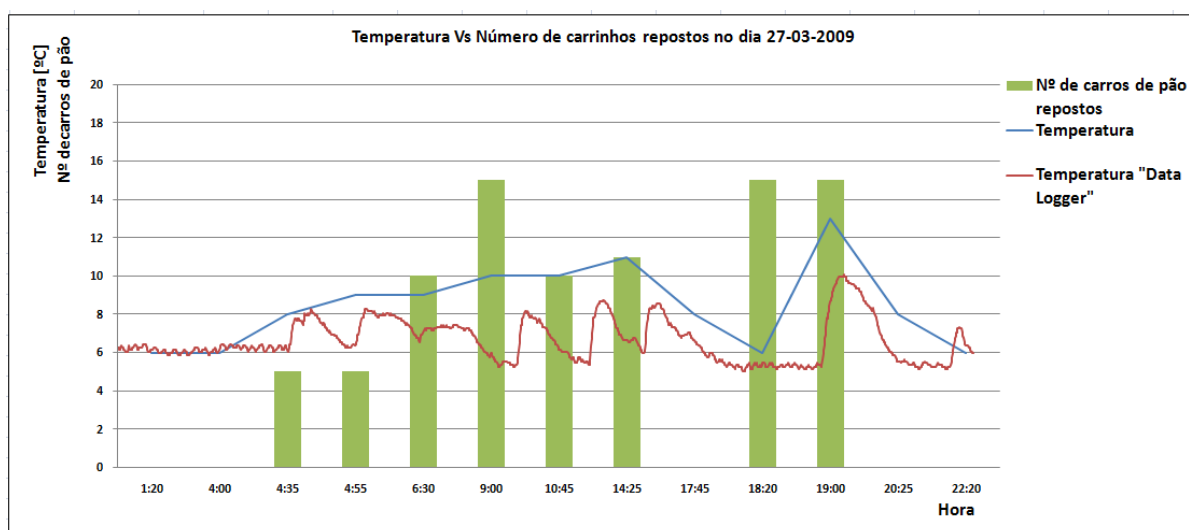


Figura 17 – Comparação dos dados registados no controlo da refrigeração com os do “data logger”

Na Figura 17 é feita uma comparação entre os dados recolhidos através do “data logger” e o controlo de refrigeração, com o número de carrinhos de pão que são repostos. Pode-se observar que quando são introduzidos carrinhos com pão de forma na câmara de refrigeração a temperatura da câmara aumenta.

### 4.3. O pão de forma

O pão de forma é introduzido dentro da câmara de refrigeração à temperatura média de 28°C.

#### 4.3.1. Características geométricas

Conforme é mencionado no capítulo 3, nos tipos de produtos, existem dois formatos de pão de forma. O considerado “*normal*” é o pão de forma grande e o mini pão é o pão de forma pequeno. Para os estudos realizados foi definido o pão com a geometria aproximada ao pão de forma “*normal*”. Para a recolha dos dados de uma forma correcta e coerente foram retirados os dados de 10 pães de forma e usou-se a sua média para os estudos realizados (Tabela 4).

Tabela 4 – Medidas do pão de forma

Elementos	Unidades	Nomenclatura	Média
Comprimento	[mm]	c	391
Largura	[mm]	l	66
Altura	[mm]	a	81

#### 4.3.2. Características físico-químicas

Em suma, o pão de forma é constituído maioritariamente por farinha de trigo, levedura, sal e água. Dependendo do produto a ser produzido são acrescentados outros ingredientes. Para os estudos efectuados foi definido o material “*pão*” de acordo com os valores retirados da literatura relacionada ([11]; [12]), juntamente com os dados experimentais (Tabela 5).

Tabela 5 – Propriedades do pão

Designação	Unidades	Nomenclatura	Valor
Massa volúmica quando sai do forno	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_1$	2,11E+02
Massa volúmica quando entra na câmara de refrigeração	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_2$	2,03E+02
Massa volúmica quando sai da câmara de refrigeração	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_3$	2,02E+02
Calor específico	[J.Kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$C_p$	2,59E+03
Difusividade térmica	[m.s <sup>-2</sup> ]	$\alpha$	1,36E-07
Condutividade térmica	[W.m <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	K	1,56E-01

#### **4.3.3. Condições de Armazenamento**

O pão de forma é armazenado em tabuleiros que são introduzidos no carrinho de armazenamento. No tabuleiro o pão de forma tem um espaçamento quase nulo, mas entre tabuleiros o pão tem um espaçamento de aproximadamente 10 mm em altura e 30 mm em largura. Estes carrinhos de armazenamento do pão podem conter aproximadamente 500 pães de forma “*normais*”. Normalmente os carrinhos de pão de forma são armazenados em que o comprimento do carrinho está alinhado perpendicularmente ao comprimento da câmara, conforme se pode observar na Figura 13.

Não existe espaçamento entre os carrinhos, excepto no lado onde existe o puxador o qual impõe um espaçamento de aproximadamente 150 mm.

#### **4.4. Conclusões do capítulo**

A câmara de refrigeração pode conter no máximo 50 carrinhos de pão. Um carrinho de pão pode conter aproximadamente 500 pães de forma. O espaçamento entre o pão no tabuleiro é quase nulo, mas entre tabuleiros existe aproximadamente 90 mm. As propriedades e dimensões do pão foram retiradas da bibliografia consultada ([11]; [13] a [15]) e outras experimentalmente. A temperatura média interna da câmara é de 7,4°C e o caudal mássico de ar injectado para o seu interior é de 13,7 kg/s à temperatura média de 7,2°C.

# Capítulo 5

## Capítulo 5 – Modelação e simulação numérica

### 5.1. Introdução

A modelação e posteriormente a simulação numérica permitem que sejam simuladas as situações reais para que posteriormente se encontrem soluções que visem otimizar o processo de refrigeração. Assim foram realizados vários estudos de forma a encontrarem-se soluções de fácil implementação. Esses estudos incluem o projecto base o qual é comparado com valores recolhidos experimentalmente, de forma a validar o modelo dos estudos.

### 5.2. SolidWorks

O programa SolidWorks oferece opções de CAD 3D e validação de dados. Contém todas as ferramentas necessárias para fazer qualquer tipo de modelação, permitindo projectar todos os produtos próximo da realidade [16].

Para os estudos realizados foram modelados todos os constituintes através do SolidWorks e exportados os ficheiros modelados para o Ansys CFX.

### 5.3. ANSYS 12

ANSYS, Inc fornece programas que permitem minimizar custos e tempos de trabalho. O ANSYS foi pioneiro no desenvolvimento e aplicação de métodos de simulação para resolver os mais diversos desafios de engenharia. Com diversos parceiros, investidores e utilizadores, a ANSYS, dispõe de vários programas que permitem simular diversas aplicações. Da oferta existente salienta-se o ANSYS CFD [17].

ANSYS CFD - “Computational fluid dynamics” (CFD) é um método da engenharia que permite simular diversos cenários computacionalmente. Aliado a este programa encontra-se o ANSYS CFX e o FLUENT que permitem fazer as mais diversas simulações de fluidos e transferência de calor. O uso de propriedades reais de gases e sólidos e a ergonomia que existe em configurar todos os detalhes da simulação a ser feita, permitem que os resultados obtidos tenham uma grande exactidão [17].

#### 5.4. Simplificações consideradas

Inicialmente foram feitos estudos com o intuito de descobrir quais as simplificações que podiam ser feitas, de forma a diminuir o esforço computacional mas sem reduzir substancialmente a exactidão das simulações. De seguida iniciaram-se estudos mais concretos, isto é, simularam-se situações diferentes, tais como, o posicionamento do pão, a forma como o ar é introduzido dentro da câmara de refrigeração, o espaçamento entre o pão e os seus carrinhos, assim como a possibilidade da existência de uma antecâmara para fazer um arrefecimento prévio do pão antes de entrar na câmara de refrigeração.

Devido à limitação de hardware e ao tempo da realização dos testes numéricos foi necessário fazer algumas simplificações nos estudos efectuados, mantendo a veracidade dos resultados o mais próximo possível do real.

Foram realizadas as seguintes simplificações:

- Nos estudos realizados, foi colocado um plano de simetria no centro da câmara de refrigeração. Assim, modelou-se somente metade da câmara de refrigeração, simplificando o processo da criação da malha, diminuindo o esforço computacional, sem que com isto a precisão dos resultados finais fosse comprometida.

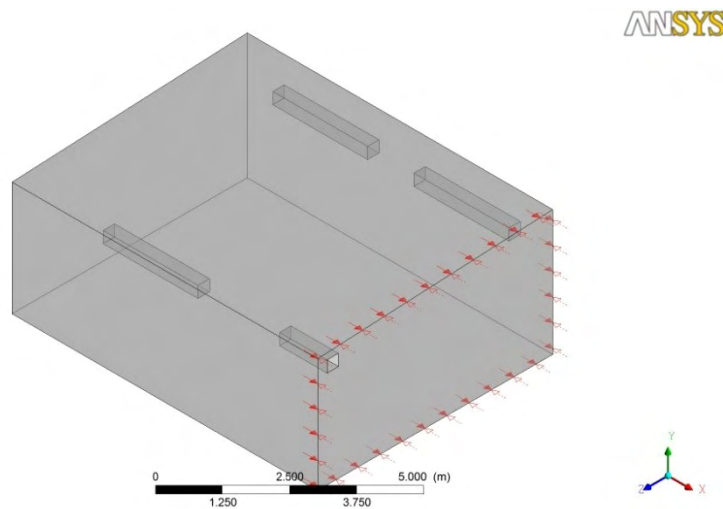


Figura 18 – Metade da câmara de refrigeração com o plano de simetria

- Cada evaporador foi simplificado como um paralelepípedo. Os dados mais importantes dos evaporadores são as medidas e as propriedades do ar que é injectado a partir deles. Assim, foram usadas as medidas dos evaporadores, o valor do caudal mássico e a temperatura do ar que é injectado. Estes valores foram definidos no projecto base.
- Para os estudos com um maior número de pão armazenado no interior da câmara, procedeu-se à simplificação do pão de forma, para uma versão designada de “pão simples”. Esta simplificação foi devida à necessidade de diminuir o número de elementos, para que a criação da malha fosse possível com a memória disponível no computador. Este “pão simples” corresponde a 10 pães de forma unidos.

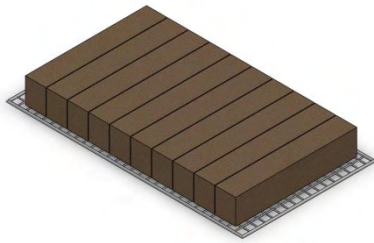


Figura 19 – Tabuleiro com 10 pães de forma



Figura 20 – “pão simples”.

- Devido à forma complexa do carrinho conclui-se que a modelação completa deste tornava a simulação muito lenta ou, na maior parte dos estudos, impossível de ser realizada com o hardware disponível. Assim, foram usadas as distâncias entre o pão que eram impostas pelo carrinho e pelos tabuleiros, mas com estes componentes suprimidos.

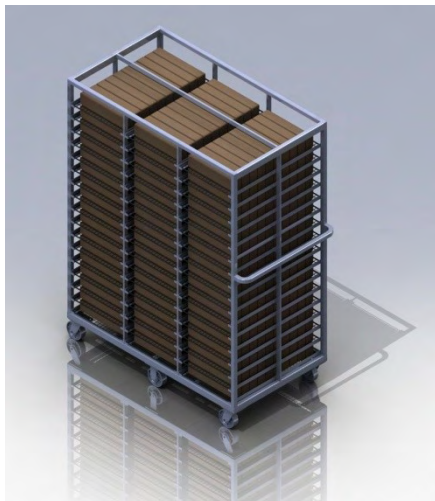


Figura 21 – Carrinho de armazenamento completo

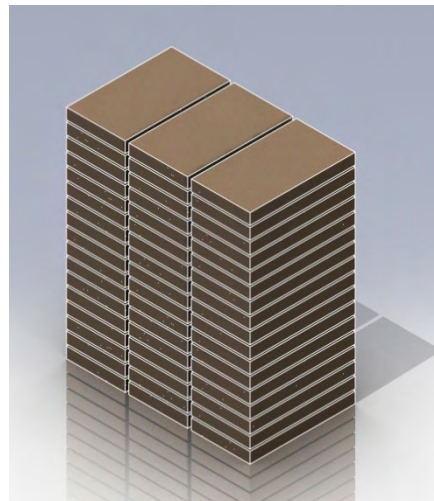


Figura 22 – Carrinho de “pão simples”

- Dependendo do estudo realizado, o máximo de carrinhos completos de “pão simples” no interior da câmara foi de 18, o que corresponde a aproximadamente 35% da capacidade máxima da câmara de refrigeração.
- A humidade relativa é um factor que existe no processo real mas que na simulação não é incluído. Esta simplificação não influencia a comparação entre os resultados porque todas as simulações foram realizadas de uma forma coerente, não sendo incluída a humidade relativa em qualquer um dos estudos realizados.



## 5.5. Modelação

Foram modelados todos os produtos existentes necessários que interagem com a câmara de refrigeração para a realização dos estudos. Apresenta-se de seguida os produtos modelados que foram usados nos estudos efectuados, assim como a modelação da antecâmara (Figura 23 à Figura 28).

### 5.5.1. Câmara de refrigeração

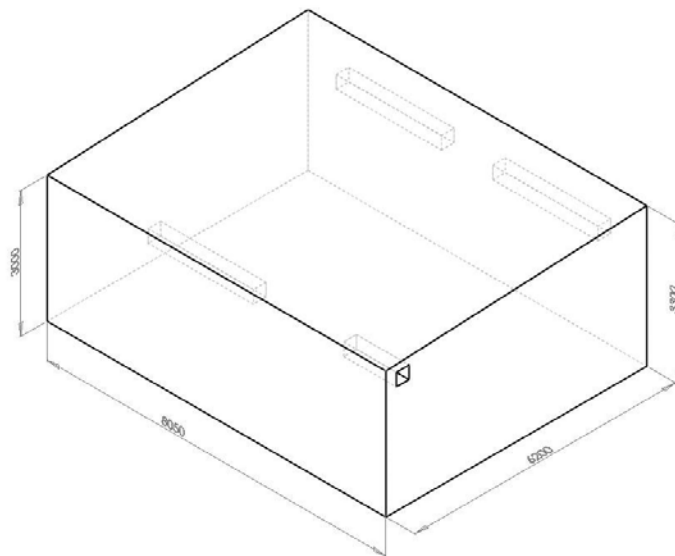


Figura 23 – Metade da câmara de refrigeração

A Figura 23 representa metade da câmara definida no projecto base. A câmara modelada na Figura 24 diferencia-se em relação à anterior pelas entradas de ar que são feitas pela zona inferior da câmara. Este modelo representa a câmara definida nos estudos variantes 4 e 6.

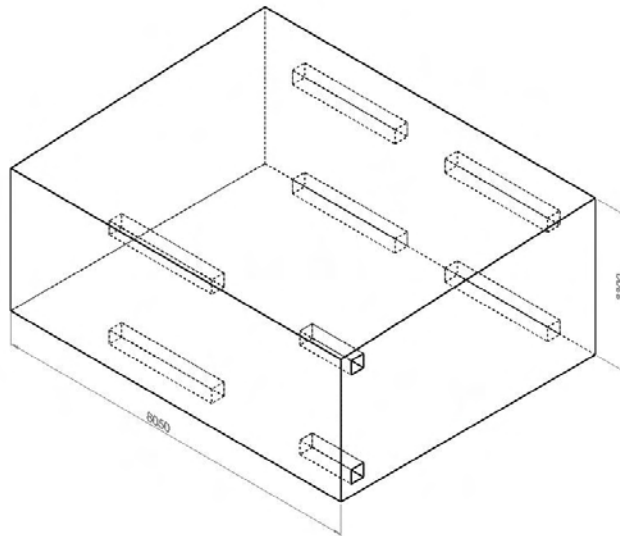


Figura 24 – Metade da câmara de refrigeração com a entrada de ar inferior

### 5.5.2. Pão e “pão simples”

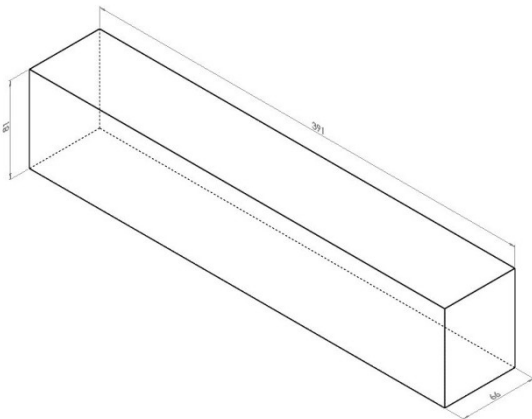


Figura 25 – Pão de forma

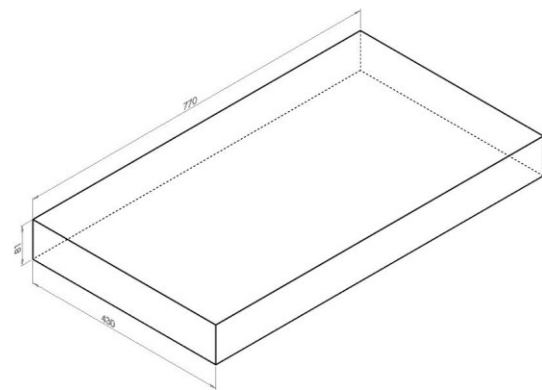


Figura 26 – “Pão simples”

A Figura 26 representa 10 pães de forma unidos (Figura 25). Este modelo foi usado em todos os estudos com excepção ao estudo 5.

### 5.5.3. Carrinho de “pão simples”

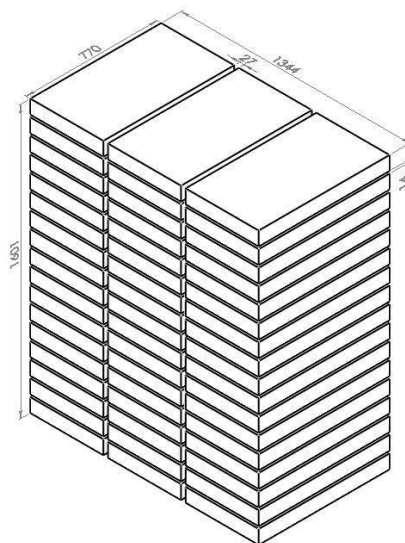
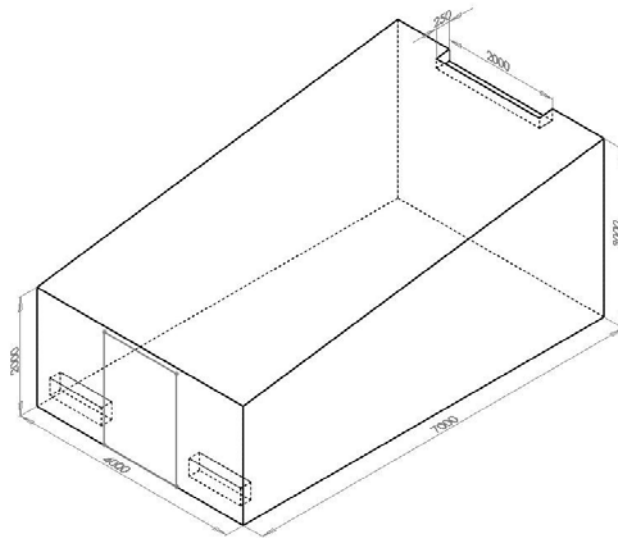


Figura 27 – Carrinho de “pão simples”

Após a supressão dos tabuleiros, rodas e estrutura do carrinho de armazenamento do pão resulta o modelo da Figura 27. Foi este modelo que se usou em todas simulações realizadas, com excepção do estudo 5.

### 5.5.4. Antecâmara

Só após todos os estudos efectuados é que se modelou esta antecâmara que tem a função de pré-arrefecer o pão de forma após a saída do forno e antes da entrada na câmara de refrigeração. Com esta antecâmara pode-se garantir que existe pão disponível para entrar na câmara de refrigeração à temperatura de 28°C. Esta antecâmara foi modelada conforme se pode visualizar na Figura 28 e em mais pormenor no Anexo F. A sua modelação foi baseada em estruturas do tipo “*chaminé solar*” e a entrada do ar é feita por uma conduta que transporta o ar vindo do exterior através de ventilação forçada.



**Figura 28 – Antecâmara modelada**

Esta antecâmara permite que sejam pré arrefecidos 6 carrinhos de pão de forma espaçados. A sua capacidade máxima pode ser maior, mas assumiu-se que a necessidade seria de apenas 5 carrinhos de pão por hora. Assim, optou-se por uma antecâmara com estas dimensões e características de forma a conseguir um pré arrefecimento do pão com uma fácil implementação e um baixo custo inicial.

## 5.6. Simulação numérica

Foram realizados um total de 24 estudos. Inicialmente foram efectuados estudos com o objectivo de entender e melhorar o processo de simulação de forma a adaptar-se melhor à realidade. Após a realização dos diversos estudos realizaram-se 5 variantes do estudo base e 1 estudo totalmente novo.

Em cada estudo variante foram realizados vários sub-estudos.

### 5.6.1. Tipo de malha

Os estudos prévios permitiram a escolha da malha que melhor se adaptou ao estudo focado. Existem várias opções para a criação de uma malha no ANSYS. Resumindo algumas das opções, transcreve-se a tabela que se encontra disponível no ficheiro de ajuda do ANSYS.

Tabela 6 – Propriedades de cada tipo de malha [17]

Parameter	Physics Preference				
	Mechanical	Electromagnetic	CFD		Explicit
			Fluent Solver	CFX Solver	
Relevance Center	Coarse	Medium	Coarse	Coarse	Medium
Element Size	Default	Default	Default	Default	Default
Initial Size Seed	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly
Smoothing	Medium	Medium	Medium	Medium	High
Transition	Fast	Fast	Slow	Slow	Slow
Span Angle Center	Coarse	Coarse	Fine	Fine	Coarse
Use Advanced Size Function	Off	Off	On: Curvature	On: Curvature	Off
Transition Ratio	0.272	0.272	0.272	0.77	0.272
Inflation Algorithm	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre
Collision Avoidance	Stair Stepping	Stair Stepping	Layer Compression	Stair Stepping	Stair Stepping
Shape Checking	Standard Mechanical	Electromagnetics	CFD	CFD	Explicit
Element Midside Nodes	Program Controlled	Kept	Dropped	Dropped	Dropped
Straight Sided Elements	No	Yes	N/A	N/A	N/A
Number of Retries	4	4	0	0	4
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Full Mesh

No trabalho feito é necessário simular o movimento de um fluido, que neste caso é o ar, dentro de uma câmara de refrigeração. Assim, este é um problema de movimento de fluidos, logo a primeira escolha da criação da malha é o parâmetro “CFD”. No parâmetro “CFD” existem dois tipos de métodos da criação de malha, o CFX e o FLUENT. Na escolha do método a usar para os estudos feitos, foi criado um estudo exemplo no qual se conclui que a criação da malha pelo método do

FLUENT é mais simples de ser feito com o hardware disponível sem que os resultados fossem comprometidos.

**Tabela 7 – Comparação entre a malha CFX e FLUENT**

	<b>CFX</b>	<b>FLUENT</b>
<b>Número de nós</b>	14164	550
<b>Número de elementos</b>	50570	2068
<b>Tetraedros</b>	38313	1984
<b>Pirâmides</b>	751	72
<b>Hexaedros</b>	0	12
<b>Poliedros</b>	0	0
<b>Temperatura máxima no pão [°K]</b>	296.502	296.19
<b>Diferença entre temperaturas [%]</b>	-0,11	

Pode-se observar pela Tabela 7, que a diferença entre a temperatura máxima no pão obtida nos dois métodos é mínima, mas que existe uma grande diferença do número de elementos. Em ambos os casos a malha tinha a refinamento mínimo. No método CFX foi especificado que o domínio pão tinha a malha mais refinada, mas no método FLUENT esse refinamento foi colocado de forma automática, sem especificar qual o domínio a ser mais refinado.

### **5.6.2. Estudo de dependência de malha**

Em cada estudo criou-se diversas malhas e obtiveram-se os resultados das simulações feitas. A escolha da malha a usar para as diversas conclusões e soluções propostas recaiu em dois parâmetros principais:

- Menor acréscimo do número de elementos da malha em cada estudo;
- Menor variação entre as temperaturas obtidas para cada malha de cada estudo;

Para o primeiro parâmetro pode ser observado no Anexo D o número de elementos de cada estudo realizado e a sua diferença. No Anexo E podem ser observados os gráficos que mostram a variação da temperatura em cada estudo.

### **5.6.3. Validação experimental**

Para validar o modelo experimental comparou-se, num ponto aproximado, a temperatura do interior da câmara de refrigeração, obtida através do “*data logger*”, com a temperatura do interior da câmara do modelo experimental. Comparando o Gráfico 1 com a Figura 29 pode-se observar que a temperatura média é muito idêntica e igual a aproximadamente 7° C.

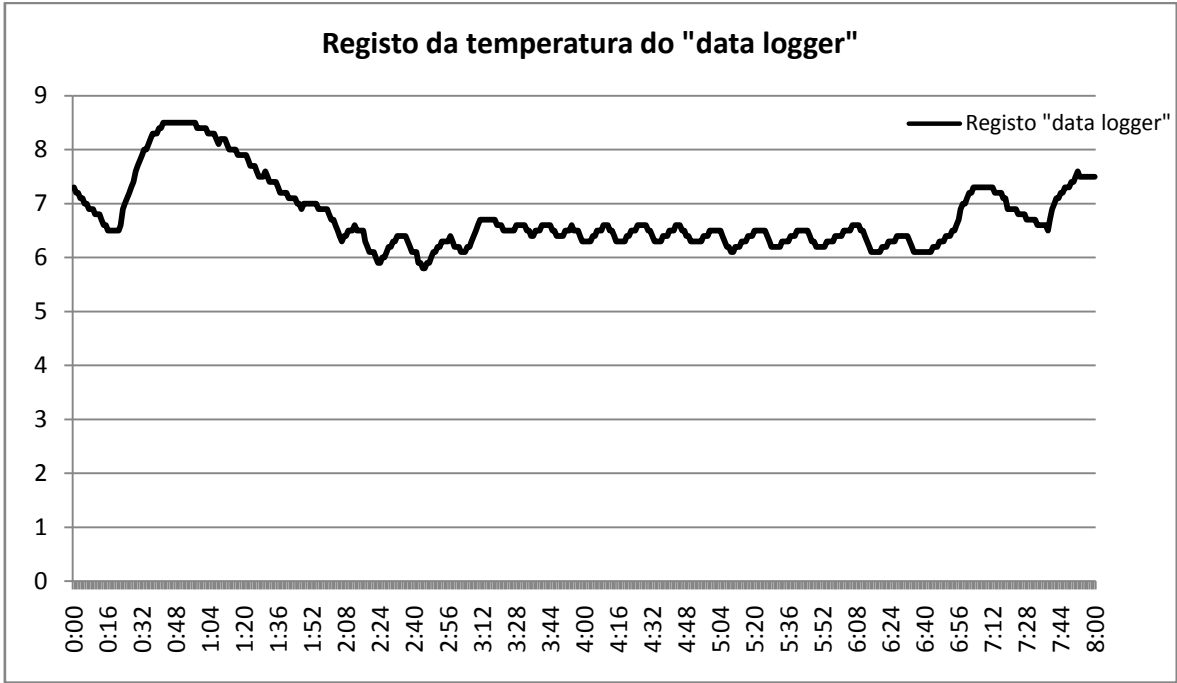


Gráfico 1 – Registo da temperatura em 8 horas no interior da câmara de refrigeração

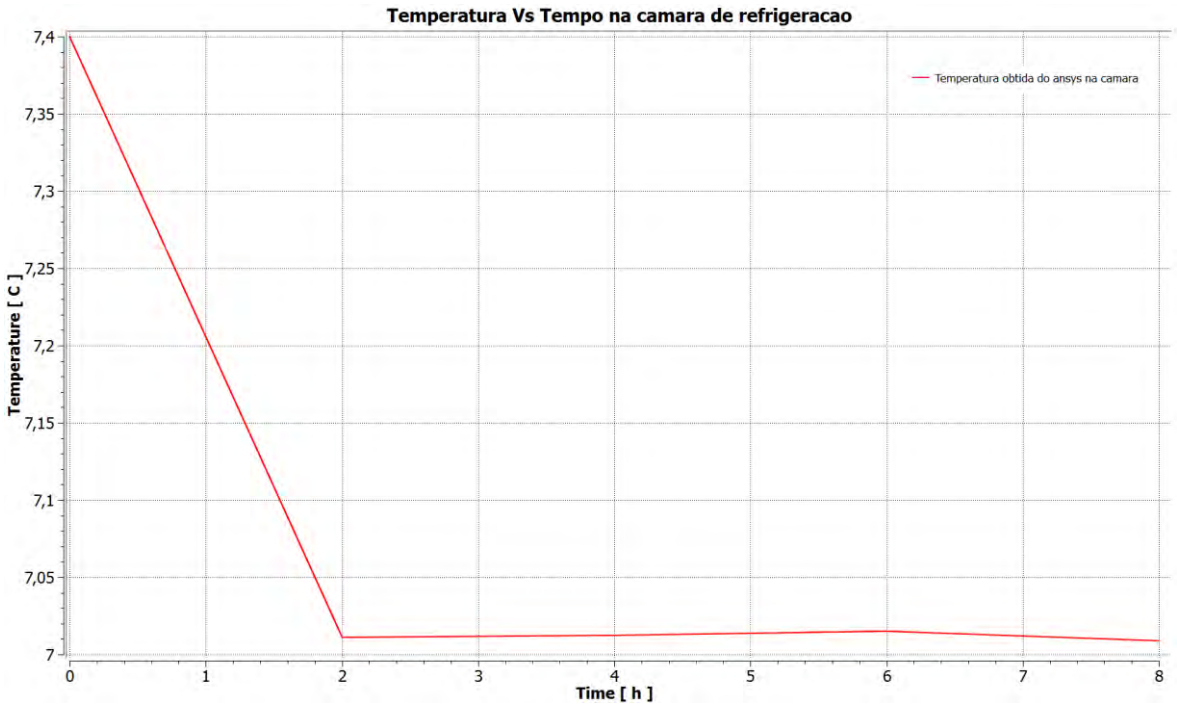


Figura 29 – Registo da temperatura durante 8 hora no interior da câmara de refrigeração

## 5.7. Definição dos estudos variantes ao projecto base

### 5.7.1. Estudo 2, 3, 4 e 6

Nos estudos de 2,3,4 e 6, existem os seguintes estudos secundários:

- Sub-estudo 1 – estudos com apenas 1 carrinho de pão de forma no interior da câmara de refrigeração;
- Sub-estudo 2 – estudos com 9 carrinhos de pão de forma no interior da câmara de refrigeração, com o espaçamento entre os carrinhos definido no projecto base;
- Sub-estudo 3 – estudos com 9 carrinhos de pão de forma no interior da câmara de refrigeração mas com um espaçamento entre eles de 300 mm.

O sub-estudo 1 tem como objectivo validar a veracidade dos dois sub-estudos seguintes. Ao se realizar este sub-estudo, pode-se concluir se existe algum erro nos sub-estudos seguintes, porque teoricamente a temperatura dos dois sub-estudos seguintes nunca pode ser superior à deste sub-estudo, por conterem um maior número de carrinhos de pão.

Os estudos 2 e 3 foram feitos com a entrada do ar na câmara de refrigeração pela zona superior, com 1 e 9 carrinhos de “pão simples” armazenados no seu interior. O comprimento dos carrinhos de pão é posicionado em paralelo ao comprimento da câmara (Figura 30 à Figura 32) e em perpendicular ao comprimento da câmara (Figura 33 à Figura 35).

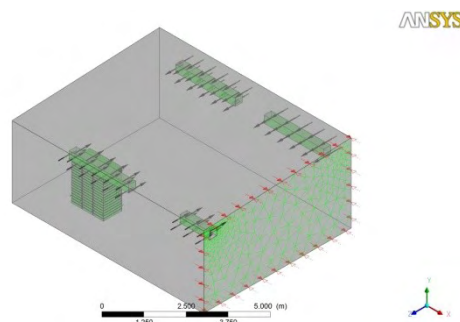


Figura 30 – Estudo 2.1

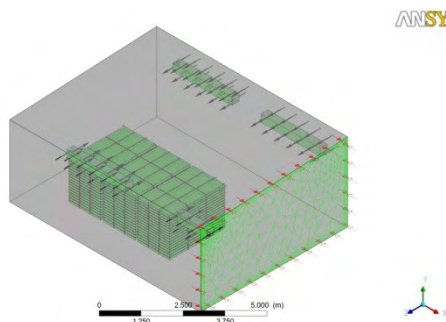


Figura 31 – Estudo 2.2

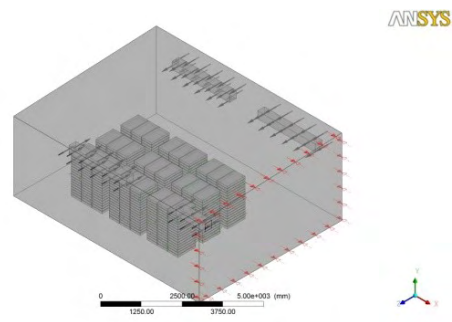
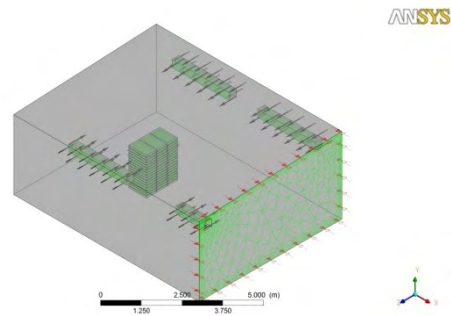
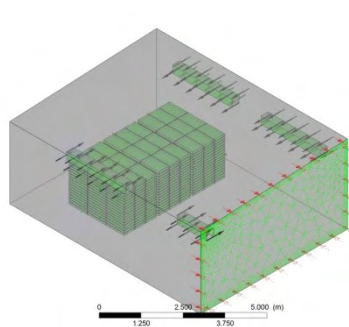


Figura 32 – Estudo 2.3

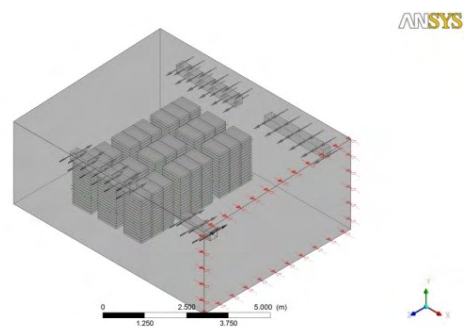




**Figura 33 – Estudo 3.1**

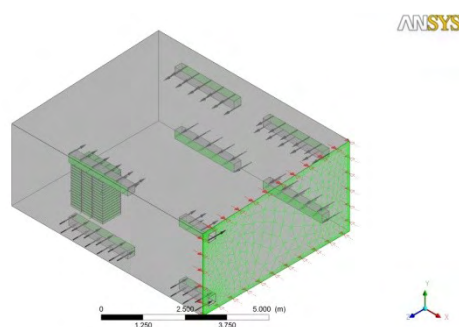


**Figura 34 – Estudo 3.2**

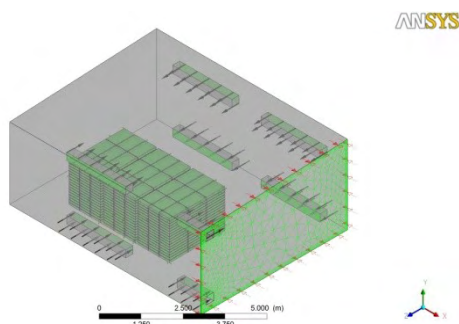


**Figura 35 – Estudo 3.3**

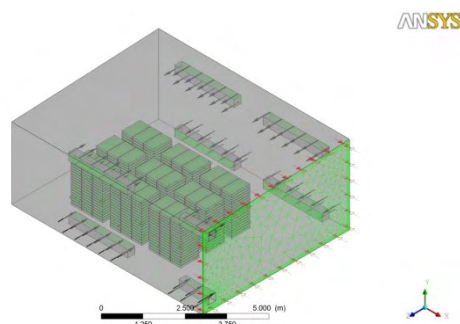
No estudo 4 e 6 a entrada de ar na câmara é feita na zona inferior. A câmara é preenchida com 1 e 9 carrinhos de “pão simples”, em que o comprimento do carrinho, em relação ao comprimento da câmara, está posicionado em paralelo (Figura 36 à Figura 38) e em perpendicular (Figura 39 à Figura 41).



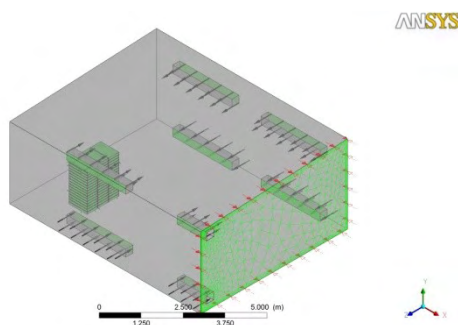
**Figura 36 – Estudo 4.1**



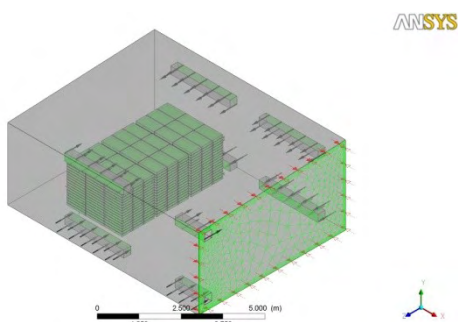
**Figura 37 – Estudo 4.2**



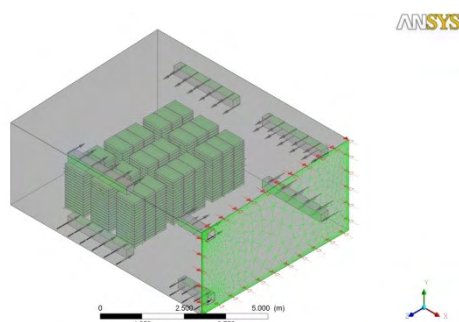
**Figura 38 – Estudo 4.3**



**Figura 39 – Estudo 6.1**



**Figura 40 – Estudo 6.2**



**Figura 41 – Estudo 6.3**

### 5.7.2. Estudo 5

A validação do modelo do “pão simples” é muito importante por ser o modelo usado em quase todos os estudos realizados. Com a comparação dos resultados deste estudo pode-se observar quais as diferenças entre o estudo “pão simples” e o estudo pão real, embora o estudo seja feito apenas com 10 pães de forma o que corresponde a 1 “pão simples”. Neste estudo foram realizados 3 sub-estudos. O sub-estudo 1 (estudo 5.1, Figura 42 e Figura 43) é o mais próximo do modelo real no qual o espaçamento entre o pão foi definido em 1 mm (o que é quase nulo). No sub-estudo 2 (estudo 5.2, Figura 44) aumentou-se o espaçamento entre o pão para 5 mm e no sub-estudo 3 (estudo 5.3, Figura 45) realizou-se o estudo com o modelo do “pão simples”.

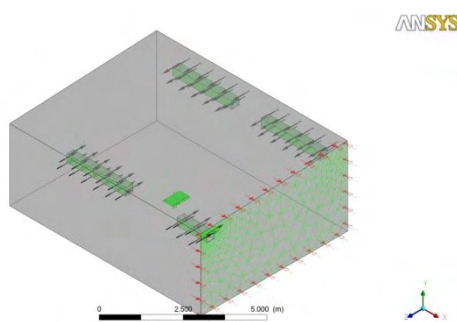


Figura 42 – Estudo 5.1

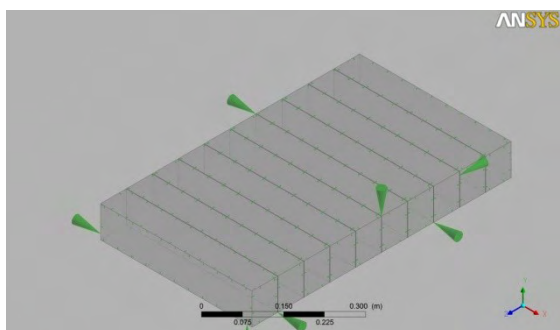


Figura 43 – Pão ampliado no Estudo 5.1

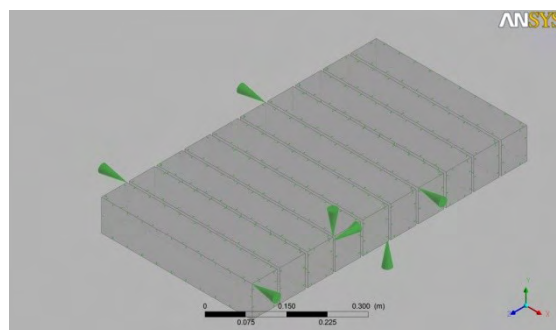


Figura 44 – Pão ampliado no Estudo 5.2

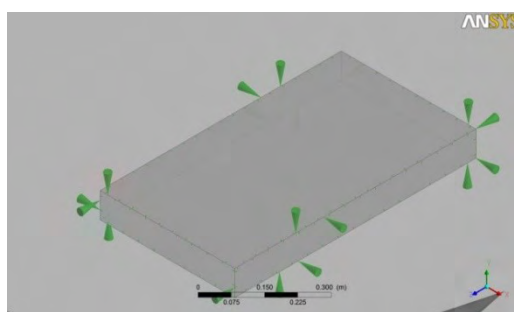


Figura 45 – “Pão simples” ampliado no Estudo 5.3

### 5.7.3. Estudo 7

Simulação de uma antecâmara preenchida com 6 carrinhos de “pão simples”. A entrada do ar é feita à temperatura ambiente enquanto a saída do ar é feita no final da antecâmara através de uma abertura superior. Este estudo resulta da necessidade de diminuir a temperatura do pão antes de entrar na câmara de refrigeração para que esta continue a refrigerar o pão no mínimo tempo possível. A entrada do ar é feita através de ventilação forçada, mas saída do ar é feita naturalmente sem o auxílio de sistemas de ventilação.

Neste estudo simularam-se 3 situações diferentes de temperaturas exteriores. Assim resultam 3 sub-estudos cada um com a entrada do ar a uma temperatura diferente.

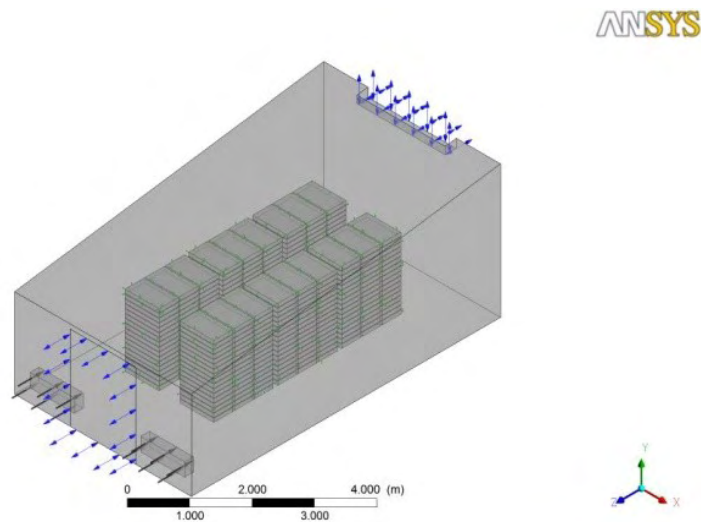


Figura 46 – Estudo 7

- *Dados do ar de entrada na antecâmara*

As características da entrada do ar podem ser observadas na tabela seguinte:

Tabela 8 – Dados do ar de entrada da antecâmara

Velocidade Média [m/s]	Comprimento [m]	Largura [m]	Área útil [m <sup>2</sup> ]	Caudal Volúmico [m <sup>3</sup> /s]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Caudal mássico [kg/s]
25	1	0,2	0,2	5	1,2034	6,02

#### 5.7.4. Definições impostas em cada variante

Em todos os estudos foram definidos dois domínios, a **câmara** e o **pão**, constituídos por várias fronteiras.

O domínio **câmara** é considerado como um fluido contínuo, o ar, no qual as suas propriedades são as do ar a 25°C. Considerou-se que o ar estava em repouso no momento inicial e tudo que se encontra dentro deste domínio estava abrangido pela força da gravidade. Este domínio é constituído por **5 fronteiras**:

- **Inlet** – Entrada de ar na câmara de refrigeração pelos evaporadores. Definiu-se para cada evaporador que o valor do caudal mássico de ar de entrada na câmara é de 13,7 kg/s a uma temperatura de 7°C. Para o estudo 7, esta entrada de ar teve 3 valores distintos de temperaturas (15, 18 e 24°C) para se simular diversas situações com temperaturas exteriores diferentes. O caudal mássico de ar neste último estudo foi definido para 6 kg/s, em cada entrada de ar.
- **Outlet** – Saída de ar da câmara pelos evaporadores. O ar sai à mesma pressão que se encontra no interior da câmara de refrigeração de forma automática de acordo com o fluxo de ar existente dentro desta. No estudo 7 o ar do interior da antecâmara sai continuamente de uma forma natural, através de uma abertura superior no fim da antecâmara.
- **OpenDoor** – Porta de entrada na antecâmara. Esta fronteira só foi aplicada no estudo 7 no qual se definiu que a porta de entrada da antecâmara se encontra sempre aberta e que a temperatura do exterior da antecâmara é de 25°C.
- **Symmetry** – Plano de simetria. No estudo 7 esta fronteira não existe.
- **Camara** – Paredes da câmara de refrigeração. Nesta fronteira definiu-se as paredes da câmara de refrigeração como adiabáticas, não existe troca de calor com o exterior e que o fluxo de ar tem um escorregamento livre nestas paredes.

O domínio **pão** é um sólido, que representa o pão no interior da câmara de refrigeração. Para este domínio foi criado um novo material, o pão, o qual possui as propriedades reais do pão obtidas pela bibliografia consultada ([11]-[12]) e conforme se pode ver no capítulo 4. Considerou-se que o pão estava a 28°C inicialmente com excepção do estudo 7, no qual a sua temperatura inicial é de 50°C.

É de salientar que também foi definida a ligação entre os dois domínios. Considerou-se um escorregamento livre entre o fluido e o sólido e a transferência de calor entre os dois domínios foi feita de uma forma conservativa. Assim, garantiu-se que o calor retirado do pão é transferido para o fluido da câmara, o qual altera a temperatura interna desta.

Os estudos simularam o arrefecimento do pão durante 8 horas e a cada 2 horas era feito o registo da simulação desse “*timestep*”. No estudo 7 o pão era arrefecido durante 2 horas com um “*timestep*” de 1 hora. No fim das simulações os dados foram tratados e seleccionados de acordo com as necessidades para a obtenção de conclusões.

### 5.8. Conclusões do capítulo

De todos os estudos feitos seleccionaram-se 6. O estudo 3.2 representa a projecto base. Nos estudos realizados foram feitas simulações variando o posicionamento e espaçamento do pão e a zona de entrada do ar na câmara de refrigeração. No estudo 2 e 3 a entrada do ar na câmara foi feita pela zona superior e no estudo 4 e 6 o ar foi injectado pela zona inferior da câmara de refrigeração.

O estudo 5 permite a validação do modelo do “*pão simples*” e conclusões acerca da distância entre o pão.

O estudo 7 visa a diminuição da temperatura do pão antes de ser introduzido na câmara de refrigeração através da criação de uma antecâmara.

# Capítulo 6

## Capítulo 6 – Análise de resultados

### 6.1. Resultados obtidos

Como é mencionado anteriormente foram recolhidos todos os dados obtidos das simulações feitas com as diferentes malhas criadas. Para tornar a leitura dos resultados mais intuitiva optou-se por colocar apenas os resultados obtidos das malhas seleccionadas (Tabela 9 a Tabela 14), sendo colocados todos os resultados em anexos (Anexo D).

Os resultados dos estudos apresentados foram retirados de planos e pontos equivalentes para 4, 6 e 8 horas de refrigeração (no estudo 2 a 6) e para 1 e 2 horas (no estudo 7). Conforme se pode observar nas figuras de cada estudo, foram criados 3 planos de corte com excepção do estudo 5 no qual só existe 1 plano, e no estudo 7 onde só existem 2 planos (ver Figura 49 a Figura 56). Os planos foram escolhidos de forma a passar pelo meio do pão por ser a zona onde teoricamente a temperatura é superior. Os resultados apresentados são do plano de corte 2 que é o que se encontra no meio dos 3 planos. Foram criados 4 pontos no plano de corte 2, sendo o ponto 1 o ponto superior, continuando a numeração dos pontos conforme se pode visualizar na Figura 47 e Figura 48. Os pontos também foram escolhidos de forma a serem colocados nas zonas onde teoricamente a temperatura será superior. Em todos os estudos foram retiradas as temperaturas mínimas e máximas que se encontram no pão, sendo estes os valores usados para a comparação entre os estudos.



Figura 47 – Pontos criados no estudo 2.2

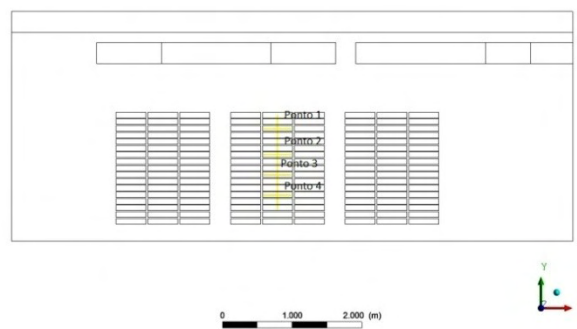


Figura 48 – Pontos criados no estudo 2.3



6.1.1. Estudo 2

Tabela 9 – Resultados do estudo 2

"Timestep" [h]	Ponto	Temperaturas obtidas [°C]		
		Estudo 2.1	Estudo 2.2	Estudo 2.3
4	1	14,66	16,63	14,97
	2	14,55	16,85	16,00
	3	14,75	16,73	16,14
	4	15,17	16,42	16,39
	Temperatura mínima	7,73	7,83	7,74
	Temperatura máxima	15,25	17,39	16,67
6	1	10,97	12,85	11,39
	2	10,92	12,83	12,20
	3	11,06	12,79	12,36
	4	11,29	12,60	12,57
	Temperatura mínima	6,60	6,68	6,67
	Temperatura máxima	11,37	13,23	12,90
8	1	8,86	10,34	9,26
	2	8,84	10,19	9,80
	3	8,93	10,19	9,94
	4	9,02	10,10	10,08
	Temperatura mínima	6,67	6,73	6,70
	Temperatura máxima	9,09	10,56	10,27

Na Tabela 9 são registados os resultados obtidos da simulação do estudo 2 com a malha mínima de 70 mm em todos os sub-estudos.

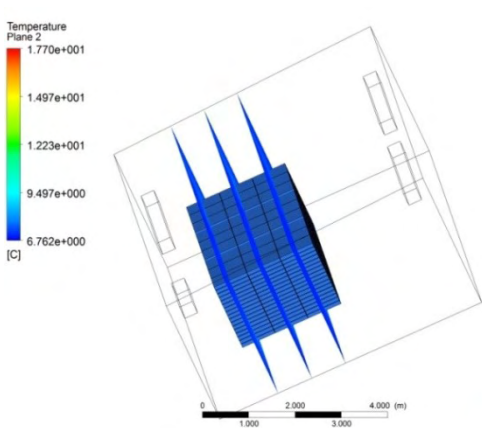


Figura 49 – Planos de corte no estudo 2.2

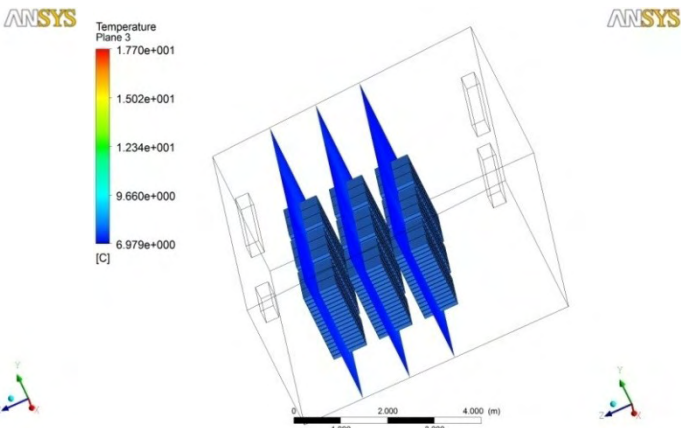


Figura 50 – Planos de corte no estudo 2.3

6.1.2. Estudo 3

Tabela 10 – Resultados do estudo 3

"Timestep" [h]	Ponto	Temperaturas obtidas [°C]		
		Estudo 3.1	Estudo 3.2	Estudo 3.3
4	1	14,51	15,87	15,06
	2	14,61	17,45	15,45
	3	14,62	17,78	15,56
	4	14,95	16,93	16,17
	Temperatura mínima	7,63	8,14	7,90
	Temperatura máxima	14,97	18,16	16,32
6	1	10,87	12,12	11,37
	2	10,97	13,41	11,75
	3	10,99	13,70	11,90
	4	11,23	13,12	12,37
	Temperatura mínima	6,54	6,94	6,73
	Temperatura máxima	11,25	13,93	12,48
8	1	8,81	9,77	9,19
	2	8,89	10,66	9,48
	3	8,91	10,87	9,62
	4	9,05	10,53	9,92
	Temperatura mínima	6,63	6,87	6,74
	Temperatura máxima	9,07	10,99	9,99

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos na simulação do estudo 3 após 4, 6 e 8 horas de simulação da refrigeração do pão. O aumento do espaçamento dos carrinhos de pão implica a diminuição da temperatura no pão entre aproximadamente 1°C a 2°C.

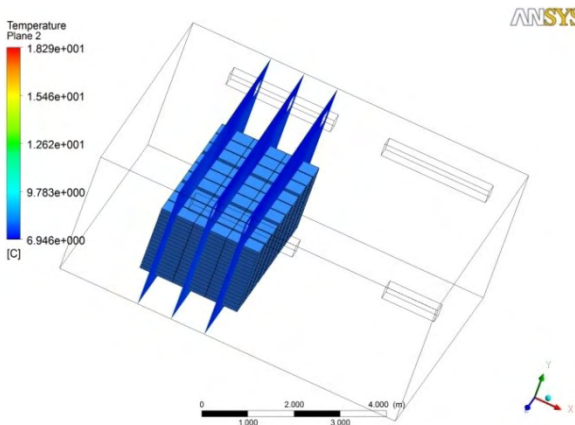


Figura 51 – Planos de corte no estudo 3.2

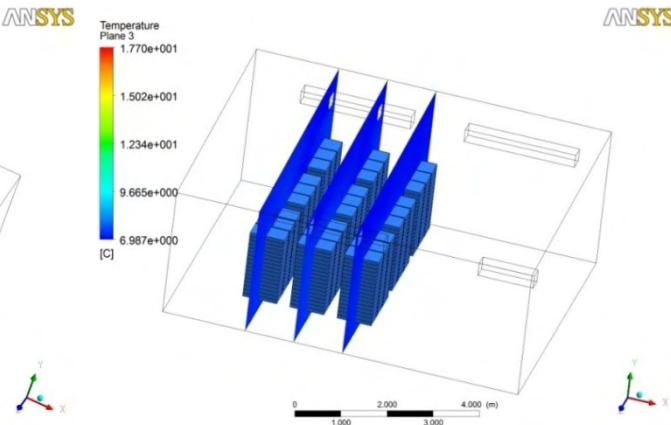


Figura 52 – Planos de corte no estudo 3.3

6.1.3. Estudo 4

Na Tabela 11 observam-se as temperaturas obtidas no estudo 4 para a simulação em 4, 6 e 8 horas. Mais uma vez, o espaçamento entre os carrinhos diminui a temperatura, mas o valor é menos significativo do que no estudo 3.

Tabela 11 – Resultados do estudo 4

"Timestep" [h]	Ponto	Temperaturas obtidas [°C]		
		Estudo 4.1	Estudo 4.2	Estudo 4.3
4	1	15,51	16,98	15,20
	2	15,60	16,67	14,95
	3	15,09	15,99	14,85
	4	14,18	15,00	15,03
	Temperatura mínima	7,15	8,59	8,46
	Temperatura máxima	15,84	17,31	16,50
6	1	11,50	12,86	11,50
	2	11,59	12,65	11,32
	3	11,23	12,12	11,22
	4	10,62	11,38	11,31
	Temperatura mínima	6,48	6,89	6,84
	Temperatura máxima	11,75	13,03	12,31
8	1	9,16	10,24	9,30
	2	9,22	10,13	9,18
	3	9,00	9,77	9,11
	4	8,65	9,28	9,13
	Temperatura mínima	6,61	6,71	6,70
	Temperatura máxima	9,31	10,31	9,75

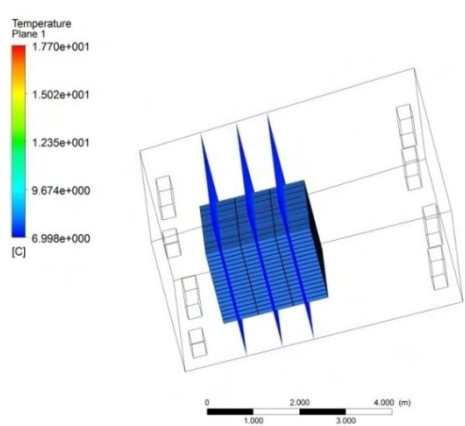


Figura 53 – Planos de corte no estudo 4.2

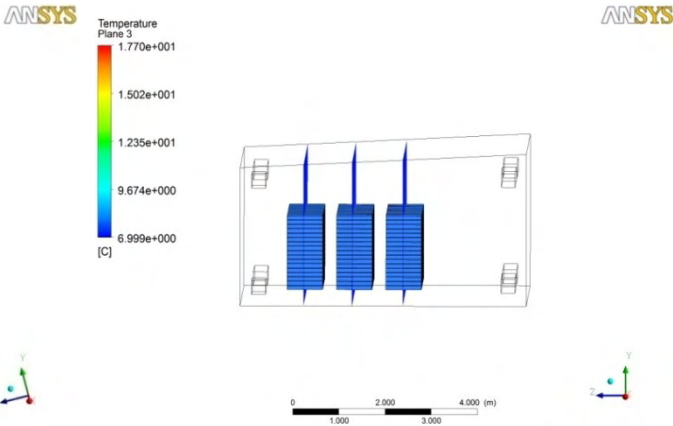


Figura 54 – Planos de corte no estudo 4.3

## 6.1.4. Estudo 5

Tabela 12 – Resultados do estudo 5

"Timestep" [h]	Ponto	Temperaturas obtidas [°C]		
		Estudo 5.1	Estudo 5.2	Estudo 5.3
4	1	4,81	3,83	8,00
	2	5,17	3,67	8,26
	3	5,04	3,64	7,48
	4	4,74	3,68	5,76
	Temperatura mínima	3,29	3,33	3,80
	Temperatura máxima	5,27	3,99	8,57
6	1	3,95	3,77	5,24
	2	4,06	3,77	5,44
	3	4,02	3,78	4,99
	4	3,90	3,80	4,23
	Temperatura mínima	3,80	3,75	3,93
	Temperatura máxima	4,08	4,00	5,61
8	1	3,94	3,94	4,31
	2	3,95	3,95	4,39
	3	3,94	3,96	4,23
	4	3,93	3,97	4,02
	Temperatura mínima	3,93	3,94	3,98
	Temperatura máxima	4,01	4,00	4,42

Pelos valores das temperaturas obtidas no estudo 5 (Tabela 12), observa-se que o espaçamento entre o pão faz diminuir a temperatura e que o modelo do "pão simples" possui temperaturas superiores.

## 6.1.5. Estudo 6

Tabela 13 – Resultados do estudo 6

"Timestep" [h]	Ponto	Temperaturas obtidas [°C]		
		Estudo 6.1	Estudo 6.2	Estudo 6.3
4	1	15,04	17,22	15,12
	2	14,96	17,14	15,26
	3	14,81	16,50	14,97
	4	14,91	15,83	14,79
	Temperatura mínima	7,23	8,20	7,77
	Temperatura máxima	15,34	17,91	15,87
6	1	11,22	13,38	11,52
	2	11,19	13,38	11,59
	3	11,09	12,83	11,35
	4	11,16	12,22	11,16
	Temperatura mínima	6,53	6,81	6,56
	Temperatura máxima	11,40	13,92	11,95
8	1	9,00	10,70	9,33
	2	8,99	10,79	9,35
	3	8,95	10,41	9,18
	4	8,99	9,93	9,04
	Temperatura mínima	6,63	6,71	6,63
	Temperatura máxima	9,09	11,08	9,61

A Tabela 13 regista o valor das temperaturas do estudo 6. O espaçamento entre os carrinhos, com o ar inserido na zona inferior, diminui a temperatura final até 2°C.

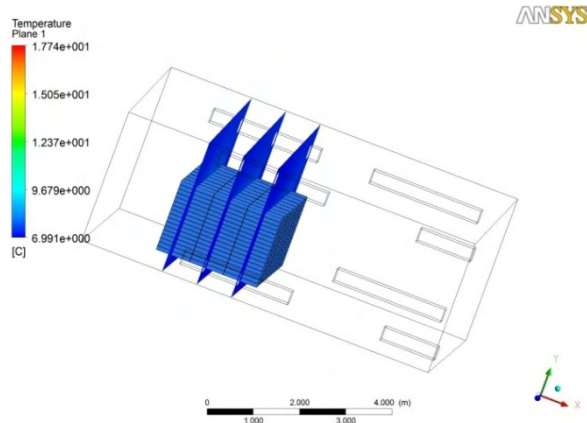


Figura 55 – Planos de corte no estudo 6.2

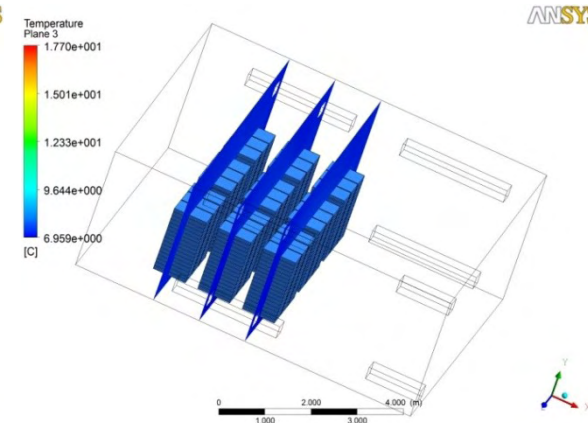


Figura 56 – Planos de corte no estudo 6.3

6.1.6. Estudo 7

O registo das temperaturas obtidas durante a simulação de 2 horas pode ser visualizado na Tabela 14. Na Figura 57 observa-se a distribuição de temperaturas no plano que corta o centro do carrinho de pão e na Figura 58 o perfil de velocidade do ar no interior da câmara para 2 horas de simulação.

Tabela 14 – Resultados do estudo 7

"Timestep" [h]	Ponto	Temperaturas obtidas [°C]		
		Estudo 7.1	Estudo 7.2	Estudo 7.3
1	Temperatura mínima	15,00	17,99	24,01
	Temperatura máxima	23,74	25,21	30,34
2	Temperatura mínima	15,02	17,95	23,96
	Temperatura máxima	21,50	24,26	29,73

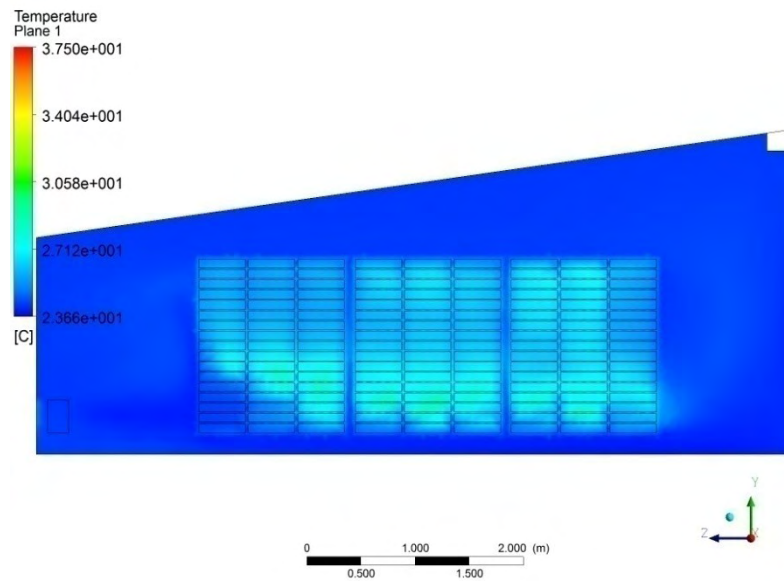


Figura 57 – Distribuição de temperaturas no estudo 7.3

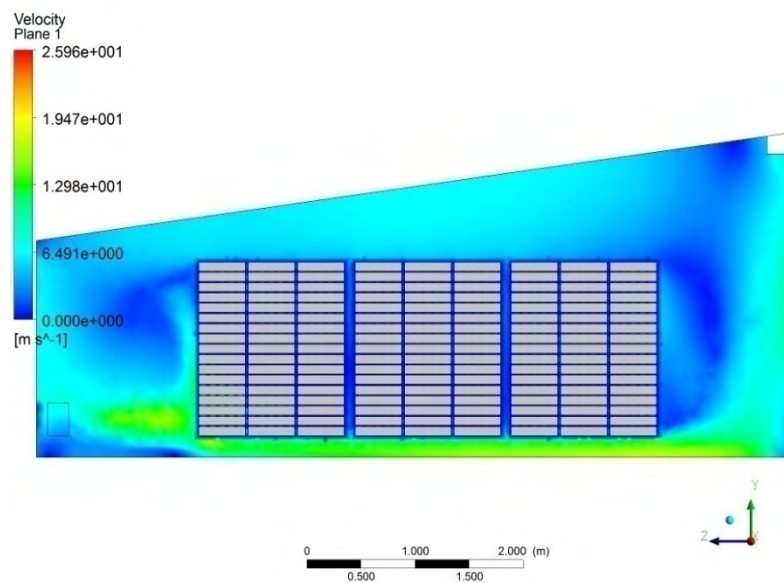


Figura 58 – Perfil de velocidades no estudo 7.3

## 6.2. Comparação entre os estudos

### 6.2.1. Comparação entre os resultados do estudo 2

Para melhor se entender e visualizar a diferença entre os diversos estudos, foram criadas tabelas com os principais resultados colocados lado a lado (Tabela 15 a Tabela 22) e figuras com a comparação entre os contornos de temperaturas, distribuição de temperaturas e em alguns estudos comparação entre o perfil de velocidades (Figura 59 a Figura 99).

Tabela 15 – Comparação entre as temperaturas máximas no estudo 2

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]			Relação de temperatura entre o estudo 2.2 e o estudo 2.3 [%]
	Estudo 2.1	Estudo 2.2	Estudo 2.3	
4	15,25	17,39	16,67	-4%
6	11,37	13,23	12,90	-2%
8	9,09	10,56	10,27	-3%

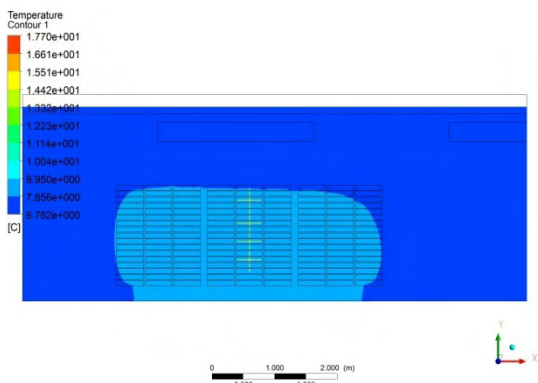


Figura 59 – Contornos das temperaturas no estudo 2.2

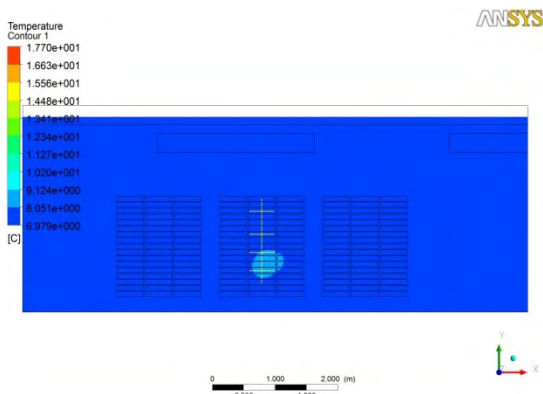


Figura 60 – Contornos das temperaturas no estudo 2.3

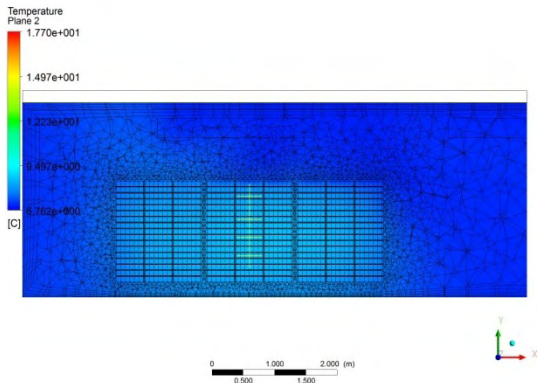


Figura 61 – Distribuição de temperaturas no estudo 2.2, com a malha visível

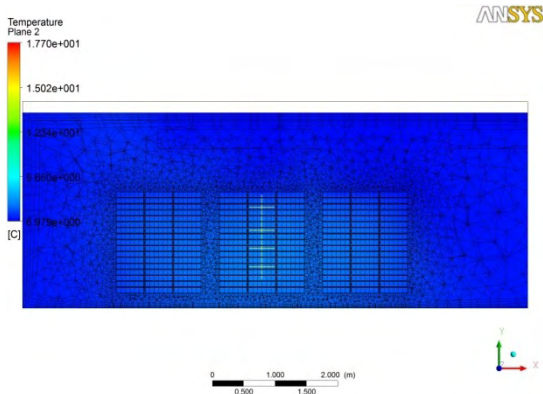


Figura 62 – Distribuição de temperaturas no estudo 2.3, com a malha visível



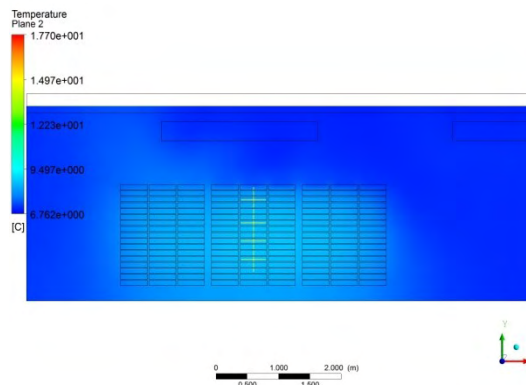


Figura 63 – Distribuição de temperaturas no estudo 2.2

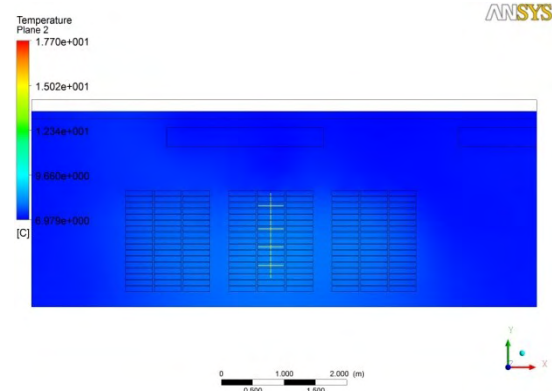


Figura 64 – Distribuição de temperaturas no estudo 2.3

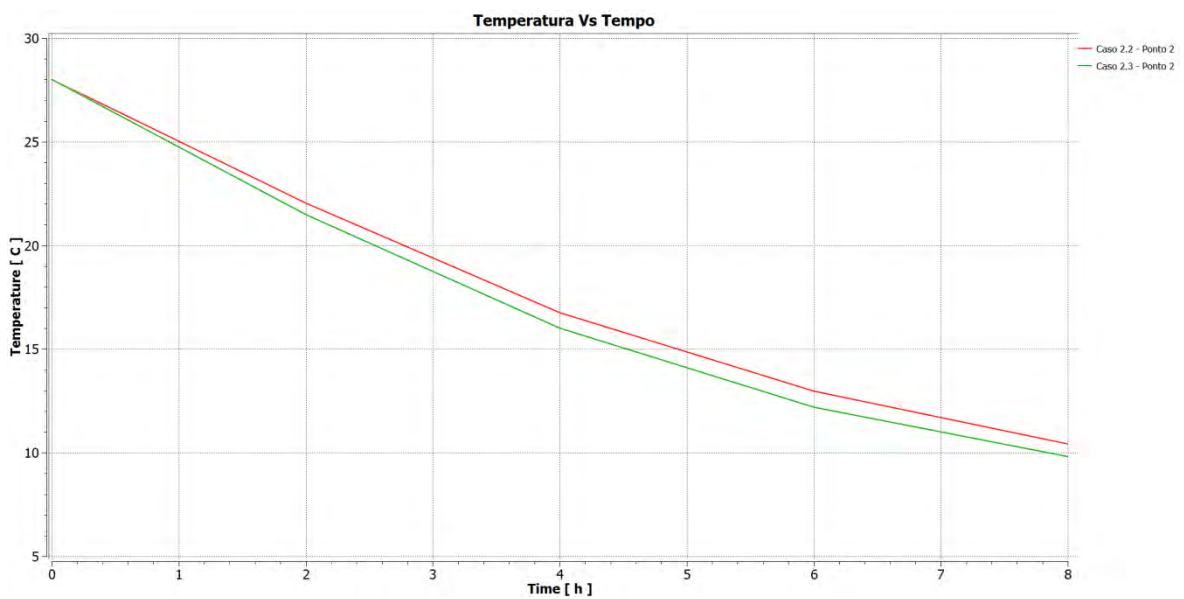


Figura 65 – Comparação de temperaturas no ponto 2 entre o estudo 2.2 e o 2.3

Conforme se pode visualizar na Figura 65 a temperatura no ponto 2 do estudo 2.3 decresce mais rápido do que no estudo 2.2.

### 6.2.2. Comparação entre os resultados do estudo 3

Tabela 16 – Comparação entre as temperaturas máximas no estudo 3

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]			Relação de temperatura entre o Estudo 3.2 e o Estudo 3.3 [%]
	Estudo 3.1	Estudo 3.2	Estudo 3.3	
4	14,97	18,16	16,32	-10%
6	11,25	13,93	12,48	-10%
8	9,07	10,99	9,99	-9%



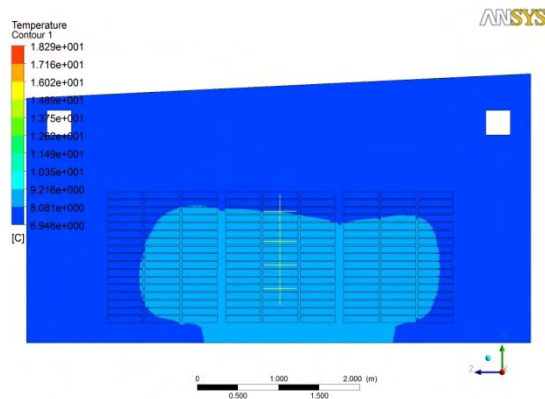


Figura 66 – Contornos de temperaturas no estudo 3.2

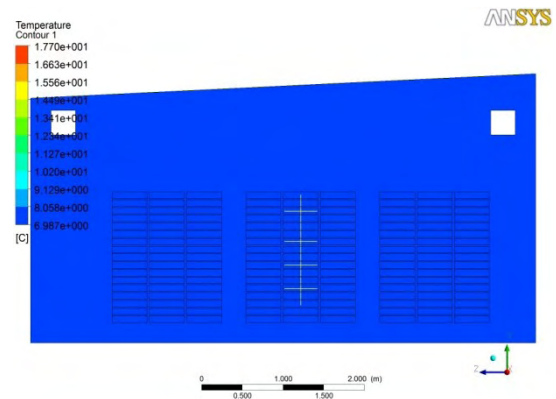


Figura 67 – Contornos de temperaturas no estudo 3.3

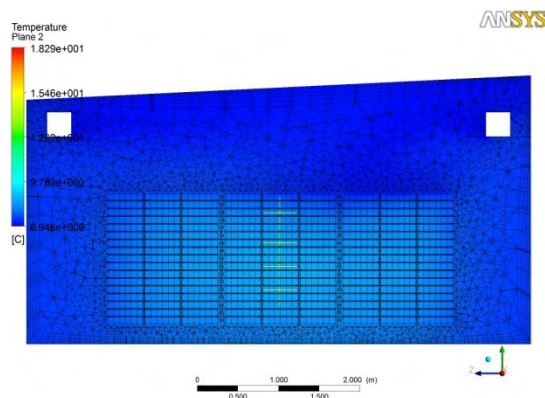


Figura 68 – Distribuição de temperaturas no estudo 3.2, com a malha visível

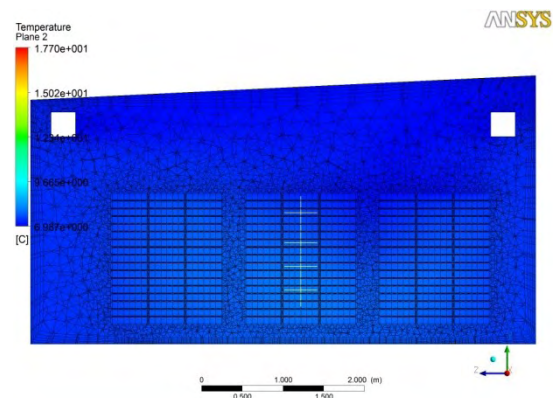


Figura 69 – Distribuição de temperaturas no estudo 3.3, com a malha visível

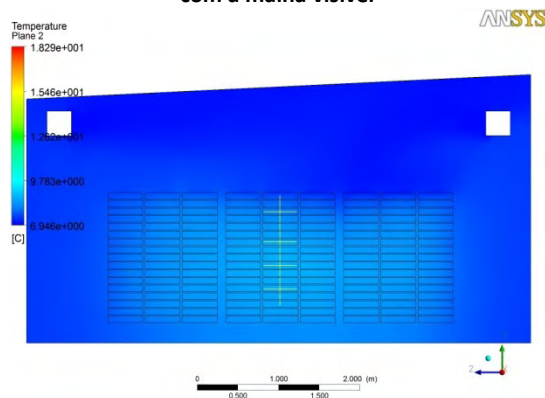


Figura 70 – Distribuição de temperaturas no estudo 3.2

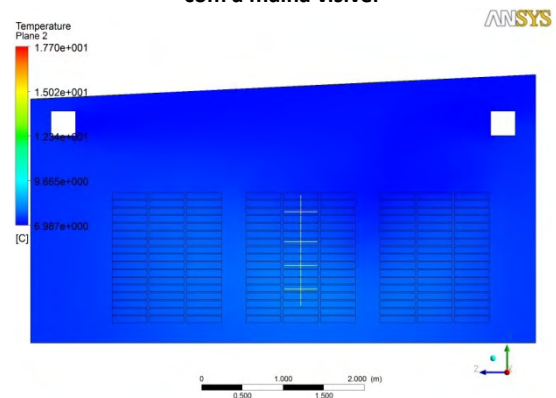


Figura 71 – Distribuição de temperaturas no estudo 3.3

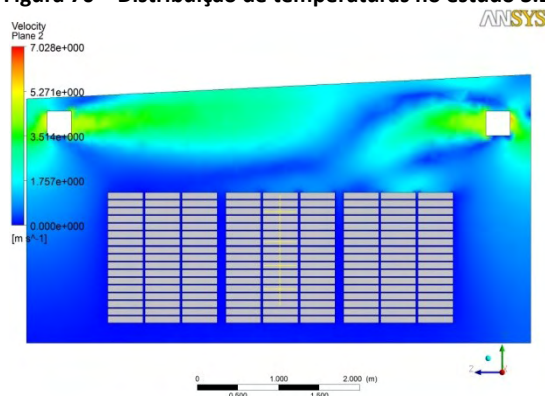


Figura 72 – Distribuição do fluxo de ar no estudo 3.2

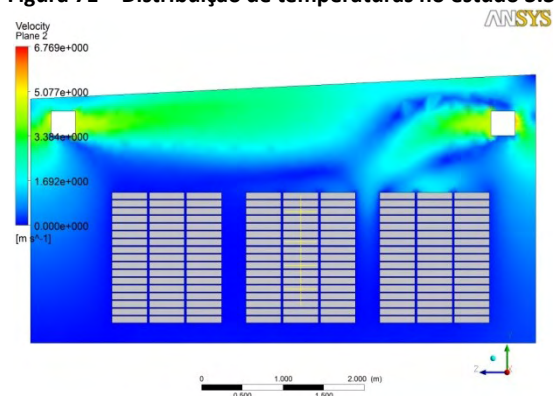


Figura 73 – Distribuição do fluxo de ar no estudo 3.3

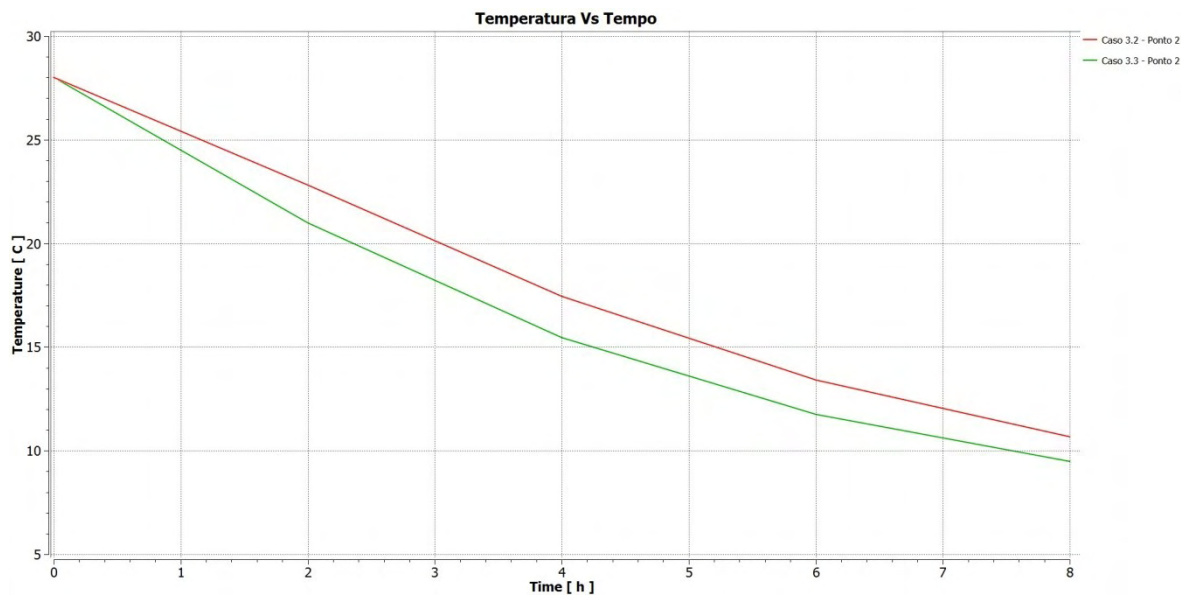


Figura 74 – Comparação de temperaturas no ponto 2 entre o estudo 3.2 e o 3.3

6.2.3. Comparação entre os resultados do estudo 4

Tabela 17 – Comparação entre as temperaturas máximas no estudo 4

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]			Relação de temperatura entre o Estudo 4.2 e o Estudo 4.3 [%]
	Estudo 4.1	Estudo 4.2	Estudo 4.3	
4	15,84	17,31	16,50	-5%
6	11,75	13,03	12,31	-6%
8	9,31	10,31	9,75	-5%

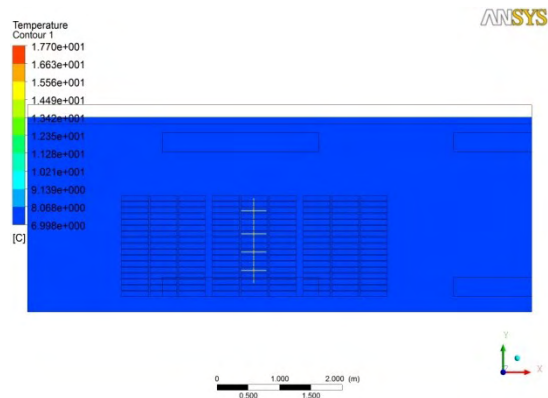


Figura 75 – Contornos das temperaturas no estudo 4.2

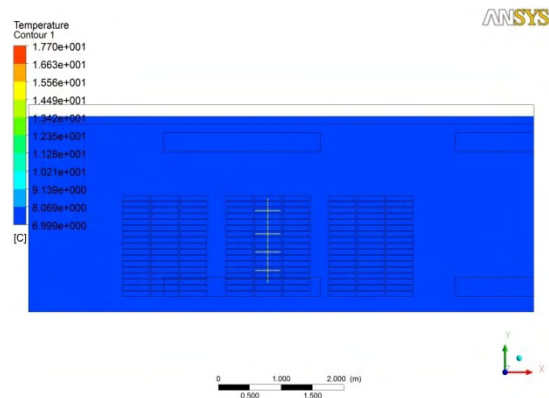


Figura 76 – Contornos das temperaturas no estudo 4.3

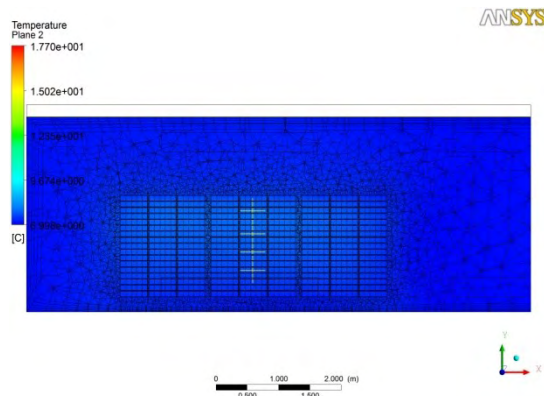


Figura 77 – Distribuição de temperaturas no estudo 4.2, com a malha visível

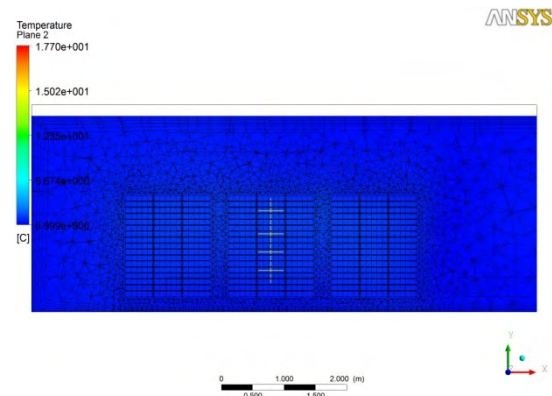


Figura 78 – Distribuição de temperaturas no estudo 4.3, com a malha visível

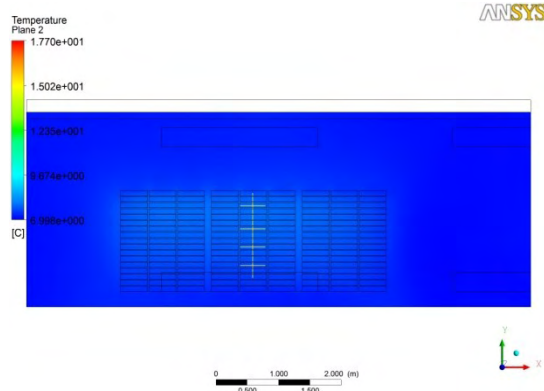


Figura 79 – Distribuição de temperaturas no estudo 4.2

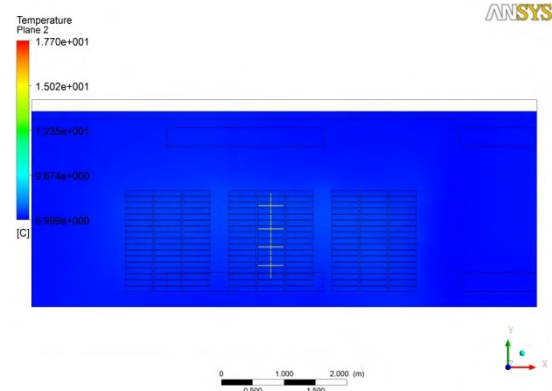


Figura 80 – Distribuição de temperaturas no estudo 4.3

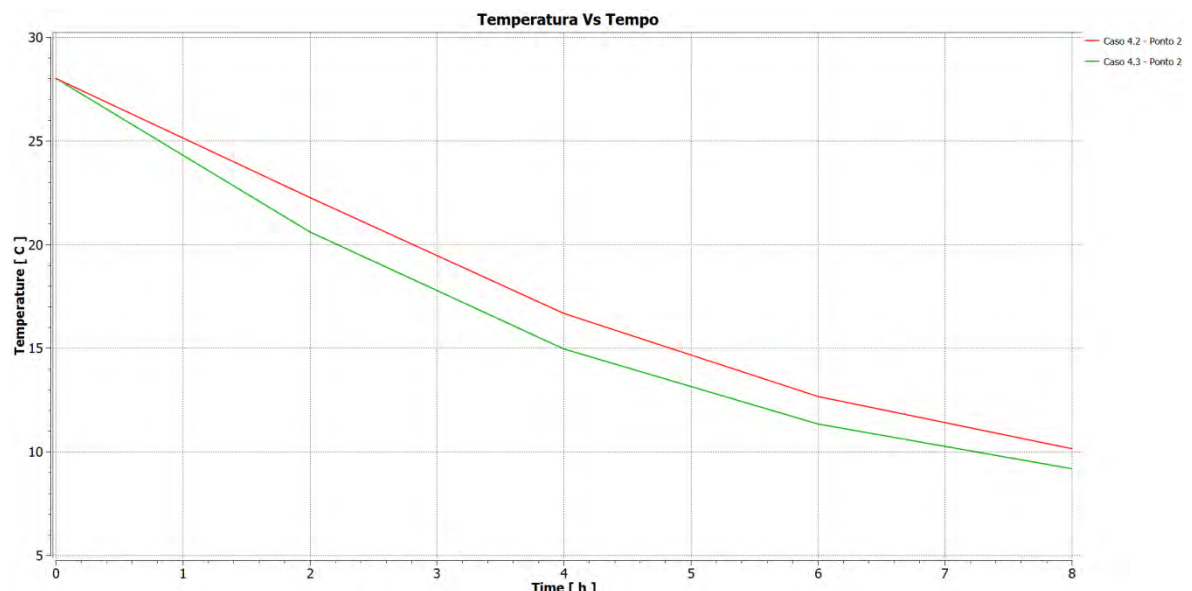


Figura 81 – Comparação de temperaturas no ponto 2 entre o estudo 4.2 e o 4.3

6.2.4. Comparação entre os resultados do estudo 5

Tabela 18 – Comparação entre as temperaturas máximas no estudo 5

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]			Relação entre temperaturas dos estudos: [%]		
	Estudo 5.1	Estudo 5.2	Estudo 5.3	5.1 Vs 5.2	5.1 Vs 5.3	5.2 Vs 5.3
2	11,00	8,41	15,29	-24%	39%	82%
4	5,27	3,99	8,57	-24%	63%	115%
6	4,08	4,00	5,61	-2%	37%	40%
8	4,01	4,00	4,42	0%	10%	10%

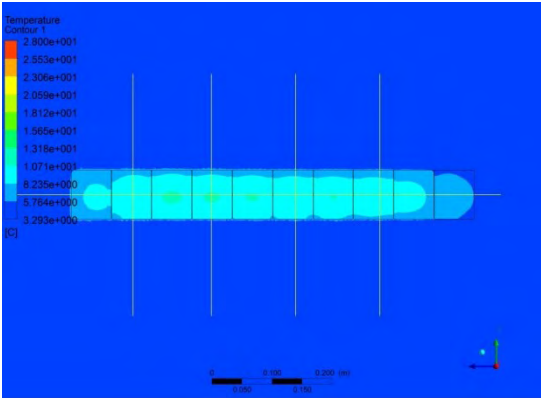


Figura 82 – Contornos das temperaturas no estudo 5.1

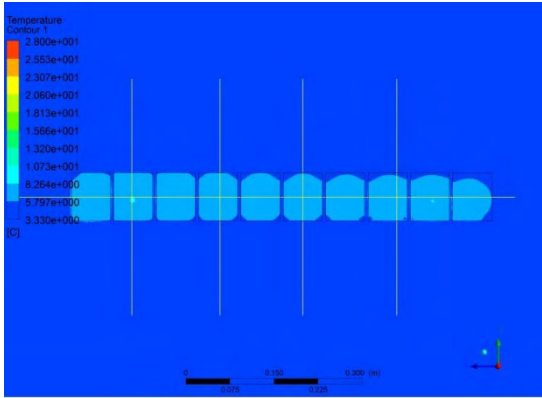


Figura 83 – Contornos das temperaturas no estudo 5.2

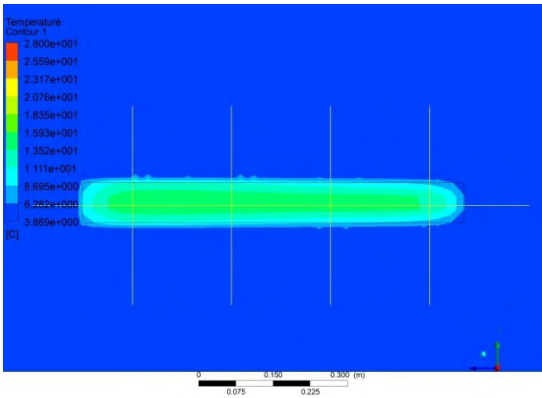


Figura 84 – Contornos das temperaturas no estudo 5.3



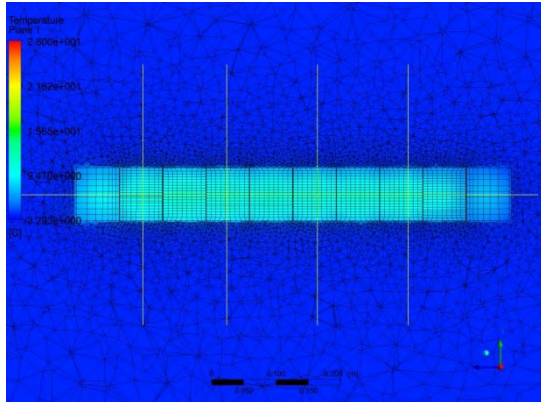


Figura 85 – Distribuição de temperaturas no estudo 5.1, com malha visível

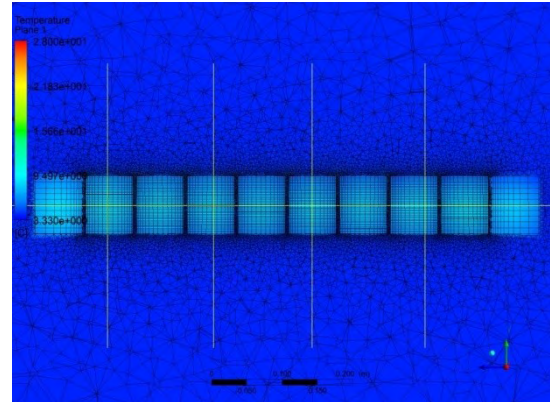


Figura 86 – Distribuição de temperaturas no estudo 5.2, com malha visível

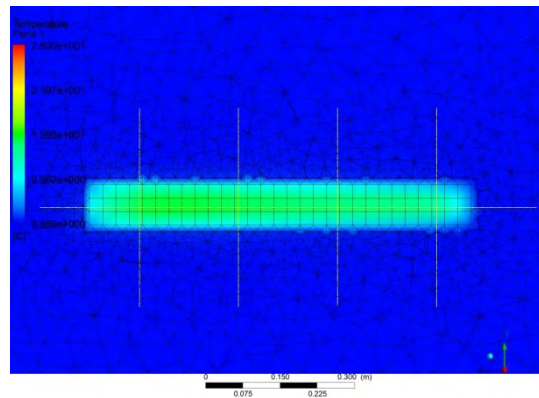


Figura 87 – Distribuição de temperaturas para o estudo 5.3, com a malha visível

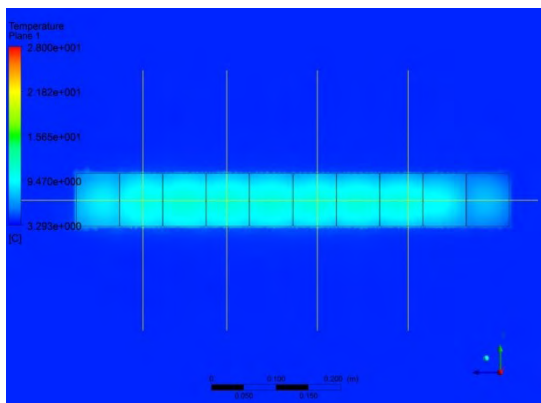


Figura 88 – Distribuição de temperaturas no estudo 5.1

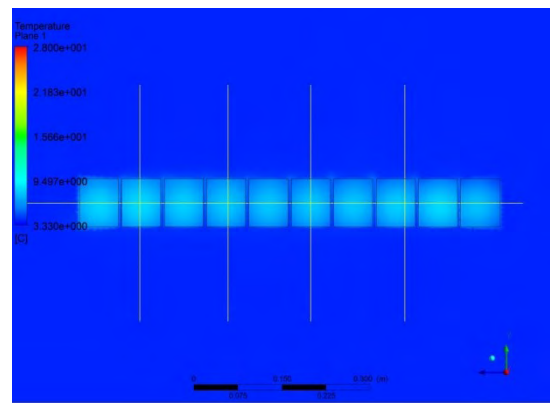


Figura 89 – Distribuição de temperaturas no estudo 5.2

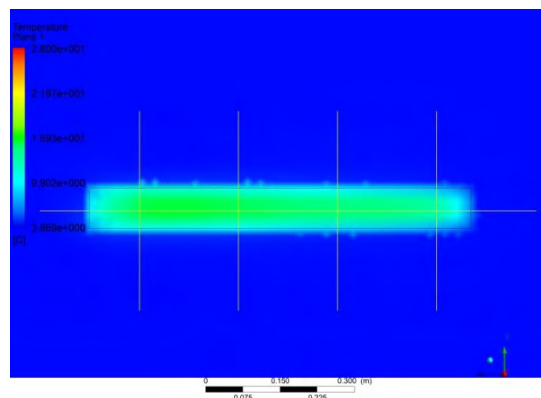


Figura 90 – Distribuição de temperaturas no estudo 5.3

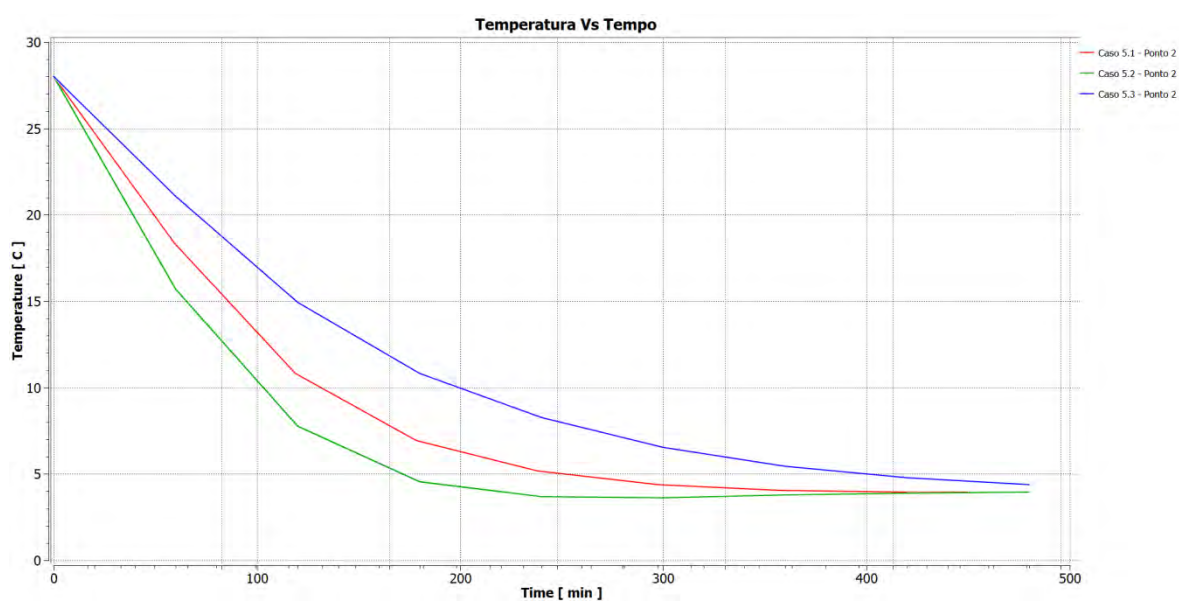


Figura 91 – Comparação de temperaturas no ponto 2 entre o estudo 5.1, 5.2 e 5.3

### 6.2.5. Comparação entre os resultados do estudo 6

Tabela 19 – Comparação entre as temperaturas máximas no estudo 6

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]			Relação de temperatura entre o Estudo 6.2 e o Estudo 6.3 [%]
	Estudo 6.1	Estudo 6.2	Estudo 6.3	
4	15,34	17,91	15,87	-11%
6	11,40	13,92	11,95	-14%
8	9,09	11,08	9,61	-13%

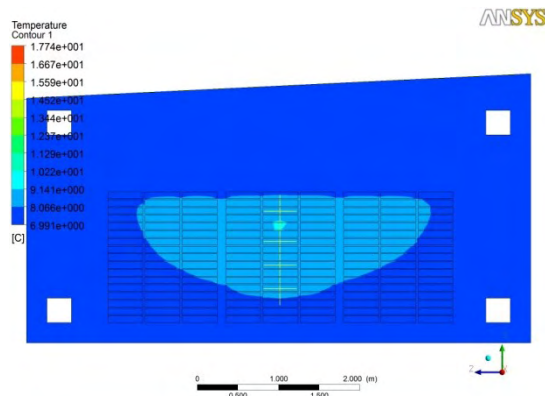


Figura 92 – Contornos de temperaturas no estudo 6.2

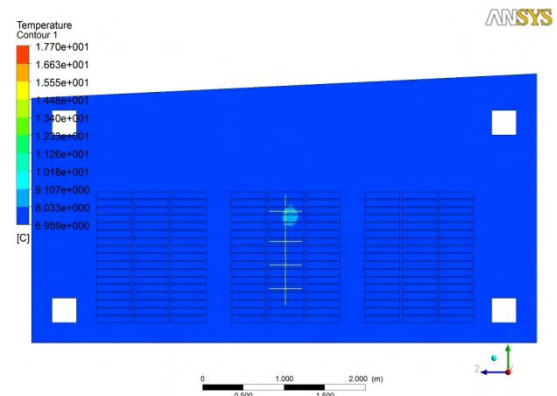


Figura 93 – Contornos de temperaturas no estudo 6.3

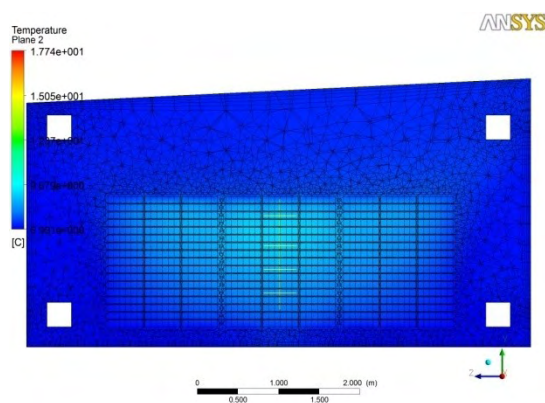


Figura 94 – Distribuição de temperaturas no estudo 6.2, com malha visível

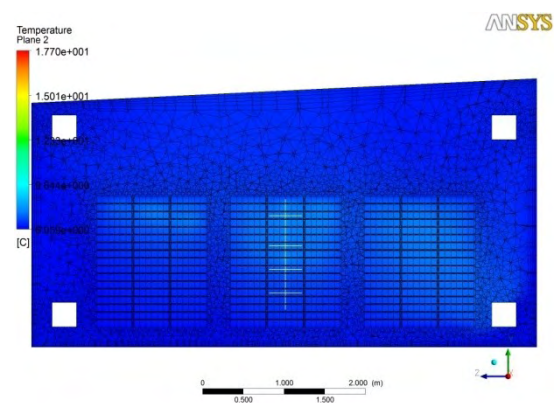


Figura 95 – Distribuição de temperaturas no estudo 6.3, com malha visível

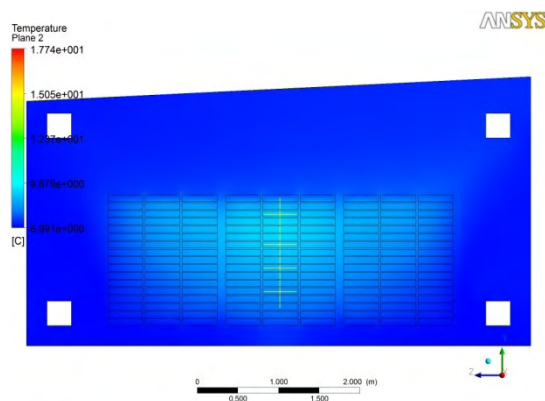


Figura 96 – Distribuição de temperaturas no estudo 6.2

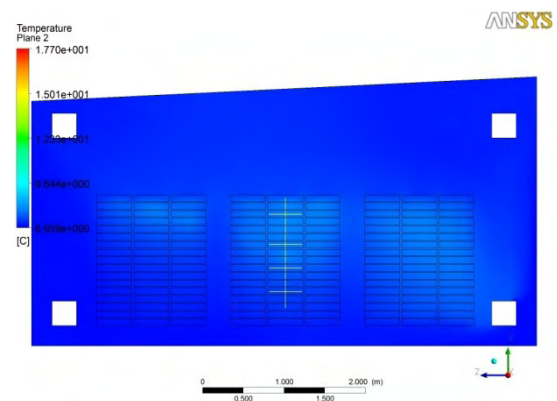


Figura 97 – Distribuição de temperaturas no estudo 6.3

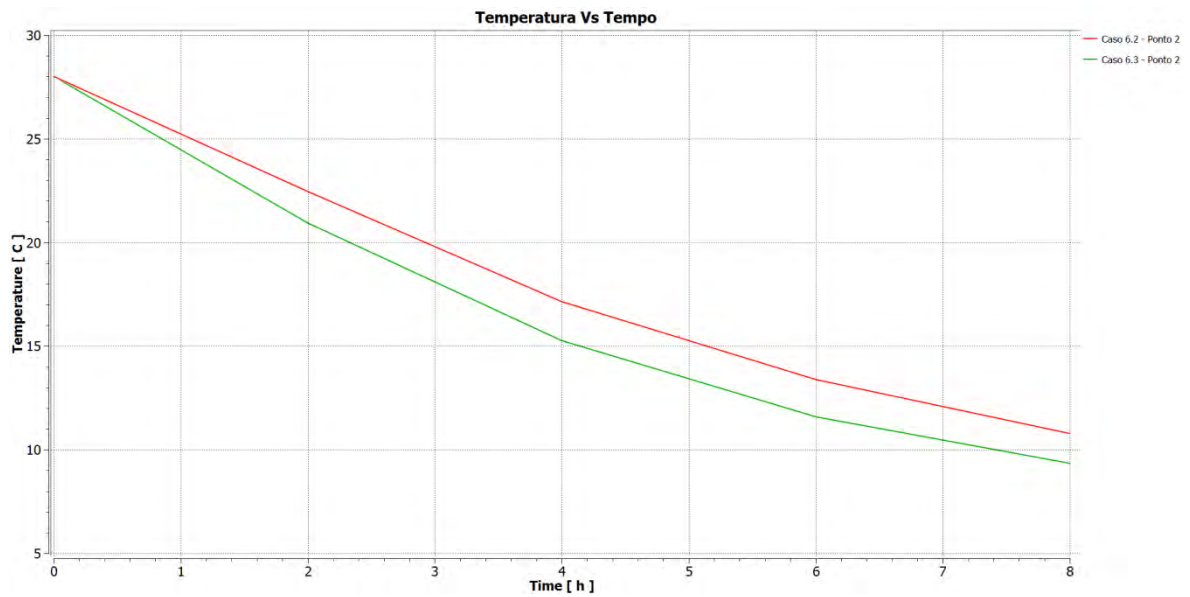


Figura 98 – Comparação de temperaturas no ponto 2 entre o estudo 6.2 e 6.3

6.2.6. Comparações diversas

Tabela 20 – Comparação das temperaturas máximas entre o estudo base e os dois melhores obtidos

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]			Relação entre temperaturas dos estudos: [%]	
	Estudo 3.2	Estudo 4.3	Estudo 6.3	Estudo 3.2 e o Estudo 4.3	Estudo 3.2 e o Estudo 6.3
4	18,16	16,50	15,87	-9%	-13%
6	13,93	12,31	11,95	-12%	-14%
8	10,99	9,75	9,61	-11%	-13%

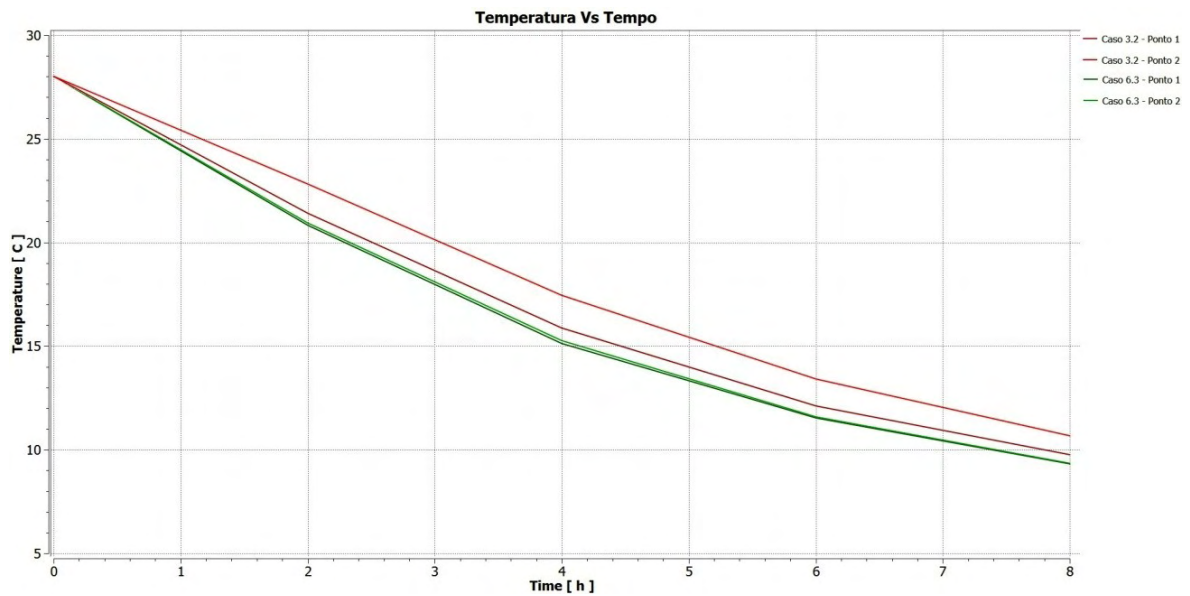


Figura 99 – Comparação de temperaturas no ponto 1 e 2 entre o estudo 3.2 e 6.3



Através da Figura 99 conclui-se que a maior diferença entre as temperaturas encontra-se nos pontos internos. A distância entre os carrinhos faz com que o arrefecimento seja mais acentuado no interior, porque com este espaçamento existe um maior fluxo de ar entre o pão.

**Tabela 21 – Comparação das temperaturas máximas entre o estudo 3.3 e o 6.3**

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]		Relação de temperatura entre o Estudo 3.3 e o Estudo 6.3 [%]
	Estudo 3.3	Estudo 6.3	
4	16,32	15,87	-3%
6	12,48	11,95	-4%
8	9,99	9,61	-4%

**Tabela 22 – Comparação das temperaturas máximas entre o estudo 3.2 e o 6.2**

"Timestep" [h]	Temperatura máxima no pão [°C]		Relação de temperatura entre o Estudo 3.2 e o Estudo 6.2 [%]
	Estudo 3.2	Estudo 6.2	
4	18,16	17,91	-1%
6	13,93	13,92	0%
8	10,99	11,08	1%

### 6.3. Conclusões do capítulo

Após os diversos estudos realizados chegou-se a várias conclusões.

No estudo 2 observou-se que o aumento da distância entre os carrinhos, do valor mínimo (estudo 3.2) para um valor de 300mm (estudo 3.3) faz com que haja um decréscimo da temperatura em 10% para o mesmo tempo de refrigeração.

Quando a entrada de ar na câmara é feita pela zona inferior não se obtém grandes melhorias face à entrada do ar no nível superior, mas quando se aumenta a distância entre os carrinhos de pão essa diferença já se acentua. Pode-se observar tais factos ao comparar os estudos 3.2 com o 6.2, no qual a diferença é mínima e mesmo próxima de 0% para o "timestep" de 6 horas, mas quando se compara o estudo 3.3 com o 6.3 observa-se que existem diferenças de 4% beneficiando o estudo 6.3.

O estudo 5 permite concluir que a distância entre o pão é uma variável muito importante e a que influencia mais o tempo de refrigeração do pão. Comparando o estudo 5.1 com o estudo 5.3 observa-se que diferenças entre as temperaturas obtidas. Para as mesmas condições, após 6 horas, o pão real está 37% mais frio que o "pão simples". É de notar que o modelo do "pão simples" não é o mais correcto, mas é o mais plausível para a realização dos estudos face às ferramentas disponíveis para a realização destes estudos. Este estudo também permite afirmar que aumentando a distância entre o pão real de 1 mm (estudo 5.1) para 5 mm (estudo 5.2) faz com que o arrefecimento do pão seja mais rápido. Comparando as temperaturas obtidas observa-se a diminuição de 24% entre o estudo 5.1 e 5.2 para um tempo de refrigeração de 4 horas. Aumen-

tando o tempo de refrigeração para 6 horas, esta comparação diminui para 2%, redução brusca justificada por o pão já ter atingido a temperatura mínima possível.

O estudo que obteve melhores resultados foi o estudo 6.3. Comparando as temperaturas máximas no pão do projecto base (estudo 3.2) com o estudo 6.3, observa-se uma melhoria de 14% no arrefecimento do pão, para 6 horas de refrigeração. Assim, o pão para atingir a temperatura desejada precisa de aproximadamente de 5 horas e 15 minutos, o que representa um decréscimo de 45 minutos no processo de refrigeração do pão.

# Capítulo 7

## Capítulo 7 – Considerações finais

### 7.1. Introdução

Os estudos realizados fizeram concluir que é possível otimizar instalações de refrigeração, de forma simples e de fácil implementação, recorrendo a estudos numéricos. Com os estudos feitos afirma-se que o posicionamento e espaçamento do pão e do carrinho de armazenamento influenciam muito o processo de refrigeração. A entrada do ar na câmara de refrigeração pela zona inferior também provou ser mais eficiente do que a entrada do ar feita pela zona superior. A criação de uma antecâmara para pré-arrefecer o pão também é aconselhável ser feita para que o pão continue a entrar na câmara de refrigeração à temperatura inicial, de 28°C, conforme os estudos realizados.

### 7.2. Soluções propostas

De acordo com os resultados obtidos, propõem-se algumas soluções.

Pelos resultados do estudo 5, no qual representou o espaçamento entre o pão no tabuleiro, conclui-se que o espaçamento do pão no tabuleiro deve existir. Para colocar o espaçamento de 5 mm entre o pão nos tabuleiros propõem-se 3 soluções:

- Recorrendo ao operador(a) que introduz o pão de forma no tabuleiro de forma a deixar um espaço entre o pão. A implementação desta medida não tem custos acrescidos mas não sendo uma tarefa prática para o operador(a) faz com que o tempo do armazenamento do pão de forma no carrinho, possivelmente, seja superior;
- Adaptar os tabuleiros actuais ou adquirir novos para que o pão mantenha o espaçamento entre si;
- Adaptar o tapete rolante de forma a introduzir no tabuleiro o pão com o espaçamento pedido.

Para se obter as condições do estudo 6.3 é necessário se adaptar o projecto base. Para existir um espaçamento de 300 mm entre os carrinhos propõe-se que sejam aplicadas guias no chão da câmara de refrigeração. Para que o ar de entrada seja introduzido na câmara pela zona inferior propõe-se que os evaporadores sejam transferidos para a zona inferior da câmara de refrigeração. Optou-se pela transferência dos evaporadores ao invés da criação de condutas que colocassem o fluxo de ar na zona inferior, porque:

- Possivelmente as condutas vão ter perdas no fluxo de ar, devido à sua geometria, fazendo com que o ar seja injectado a uma velocidade inferior;
- O investimento da criação e adaptação de condutas nos evaporadores é equivalente à transferência dos evaporadores para a zona inferior.

Pelo estudo 7, estudo realizado para um possível pré-arrefecimento do pão antes de entrar na câmara de refrigeração, propõe-se a criação de uma antecâmara, com a geometria e dimensões aproximadas à que foi modelada (Anexo F). Para o correcto funcionamento desta antecâmara são necessárias duas condutas de ar. Uma conduta para o ar de entrada e outra para o ar de saída. O ar de entrada provém de uma ventoinha que seja capaz de impor um caudal mássico de 12kg/s, que é distribuído por duas entradas na antecâmara. A saída do ar da antecâmara é feita naturalmente sem o auxílio a sistemas de ventilação forçada, sendo só necessário a construção das condutas.

Para as portas da câmara de refrigeração do projecto base é necessário uma cortina de ar para impedir que o ar exterior entre quando as portas são abertas. É recomendável o uso da cortina de ar porque não limita a entrada dos carrinhos de pão ao invés das cortinas de lamelas que não são tão práticas.

### 7.3. Análise económica

Todas as propostas apresentadas são exequíveis. Assim, através das seguintes tabelas apresentam-se 3 níveis de propostas e o tempo do retorno do investimento pode ser visto na

Tabela 23 – Orçamento das propostas apresentadas

	Designação	Quantidade	Total [€]	Proposta		
Cortina de ar com mão-de-obra		2	1242	1	2	3
Guias		10	240			
Transição de evaporador		4	1620			
Antecâmara	Ventilador	1	2118			
	Filtro	1	109,2			
	Rede	1	159,6			
	Condutas	1	420			
	Estrutura	1	4512			
	Porta	1	1500			
TOTAL			11920,8			

Tabela 24 – Tempo de retorno de cada proposta

Proposta	Tempo de retorno do investimento [meses]
1	6,4
2	8,7
3	33,4

O valor das propostas apresentadas foi facultado pela empresa de instalação de sistemas de frio industrial Cordeiro e Garrelhas, Lda. Estes valores incluem a mão-de-obra e o IVA.

O preço da antecâmara faz com que o tempo de retorno do investimento seja um pouco mais de dois anos e meio, mas a estrutura seleccionada é feita com os materiais adequados de uma câmara de refrigeração.

#### 7.4. Conclusões

A refrigeração do pão é um processo necessário e importante na produção de tostas. Com este trabalho foi feita uma optimização do processo de refrigeração do pão através de estudos numéricos em CFD. Os estudos realizados simularam diferentes formas do pão ser armazenado no interior da câmara de refrigeração, modificando o posicionamento e espaçamento dos carrinhos de pão e a entrada do ar no interior da câmara pela zona inferior ou superior. Foi feito um estudo de uma antecâmara com a capacidade de pré-refrigerar 6 carrinhos de pão de forma com o intuito de serem introduzidos a uma temperatura inferior na câmara de refrigeração.

Conclui-se que o aumento do espaçamento entre os carrinhos de pão e o aumento entre o espaçamento do pão nos tabuleiros diminuem o tempo de refrigeração do pão. Com a entrada do ar na câmara de refrigeração pela zona inferior o tempo de refrigeração do pão é inferior em comparação com a entrada do ar na câmara de refrigeração pela zona superior. Pela Tabela 25 pode-se observar em síntese qual o valor a temperatura resultante dos estudos após 6 horas de refrigeração do pão.

**Tabela 25 – Conclusão dos estudos 2, 3, 4 e 6**

Estudo	Temperatura máxima no pão após 6 horas de refrigeração [°C]	Posicionamento do comprimento do carrinho em relação ao comprimento da câmara	Espaçamento entre os carrinhos	Entrada de ar na câmara de refrigeração
2.2	13,23	Paralelo	Mínimo	Zona Superior
2.3	12,90		+ 300 mm	
3.2	13,93	Perpendicular	Mínimo	
3.3	12,48		+ 300 mm	
4.2	13,03	Paralelo	Mínimo	Zona Inferior
4.3	12,31		+ 300 mm	
6.2	13,92	Perpendicular	Mínimo	
6.3	11,95		+ 300 mm	

O estudo 3.2 que representa o projecto base prova ser o que apresenta a maior temperatura no pão após as 6 horas de refrigeração. O melhor estudo feito é representado pelo estudo 6.3 no qual apresenta uma optimização do projecto base em aproximadamente 14% em relação ao projecto base. Outro resultado interessante é a melhoria que existe no estudo 3.3 face ao estudo 3.2 (projecto base) no qual que apenas com o aumento do espaçamento entre os carrinho consegue-se uma optimização de aproximadamente 10%.

A criação da antecâmara permite garantir que existem carrinhos com pão de forma disponíveis para serem introduzidos na câmara de refrigeração à temperatura de 28°C.

**Tabela 26 - Conclusão do estudo 7**

Ponto	Temperaturas obtidas após uma hora de arrefecimento [°C]		
	Estudo 7.1	Estudo 7.2	Estudo 7.3
<b>Temperatura máxima</b>	23,74	25,21	30,34

O estudo 7.3 representa o estudo feito no pré-arrefecimento do pão, com a temperatura do ar exterior a 24°C. Mesmo com a entrada de ar a esta temperatura pode-se concluir, pela Tabela 26, que o pré-arrefecimento é positivo visto que o resultado obtido é aproximadamente 30°C, o que se encontra muito próximo do pretendido na pior das hipóteses.

Pelo estudo 5, conclui-se que o espaçamento entre o pão no tabuleiro é dos factores que mais influenciam o tempo de refrigeração do pão de forma.

**Tabela 27 - Conclusões do estudo 5**

Temperatura máxima no pão após 2 horas de refrigeração [°C]		Relação entre temperaturas dos estudos
Estudo 5.1	Estudo 5.2	5.1 Vs 5.2
11,00	8,41	-24%

O estudo 5 necessita de ser aprofundado, pelos motivos que são mencionados nos trabalhos futuros. Pelos resultados obtidos no estudo 5, no qual só foi feito com um tabuleiro com 10 pães de forma, conclui-se que o aumento do espaçamento entre o pão de forma de 1mm (estudo 5.1) para 5mm (estudo 5.2) tem uma grande diminuição no tempo de refrigeração do pão. Pela Tabela 27 pode-se observar que para um tempo de refrigeração de 2 horas a temperatura no pão com um espaçamento de 5mm é aproximadamente 24% menor que a temperatura no pão com um espaçamento de 1mm.

Dos estudos realizados resultaram 3 propostas exequíveis. A primeira proposta resulta do estudo que optimizou 10% na refrigeração do pão, no qual tem um tempo de retorno de aproximadamente 6 meses. A segunda proposta resulta dos estudos que obtiveram uma melhoria de 14% da refrigeração do pão, no qual obteve-se um tempo de retorno do investimento de aproximadamente 9 meses. A terceira proposta inclui as duas anteriores juntamente com a criação de uma antecâmara. O tempo de retorno deste investimento já é superior, sendo aproximadamente dois anos e meio.

### **7.5. Trabalhos futuros**

Sugere-se como trabalhos futuros a realização de estudos específicos mais aprofundados, através de simulações numéricas. No estudo 5, conclui-se que o espaçamento entre o pão nos tabuleiros é muito importante mas não se conseguiu quantificar de uma forma clara o ganho dessa medida no processo de refrigeração. Assim a realização de estudos do espaçamento entre o pão seria interessante permitindo que se encontrem soluções que optimizem a sua refrigeração. Estudos que englobem o carrinho do pão com os tabuleiros poderiam resultar em ideias e soluções que permitam a óptima refrigeração do pão. Posteriormente após os resultados pode ser desenvolvido e feito um carrinho completamente adaptado à indústria da panificação.



# Bibliografia

## Referências

1. **International Energy Agency (IEA)**. Key World Energy Statistics. s.l., Paris, France : STEDI MEDIA, 2008.
2. **Grenier, Alexandre, et al.** Effect of external conditions on the rate of post-baking chilling of bread. *Journal of Food Engineering*. 2002, Vol. 55, pp. 19-24.
3. **Lé, Flávio, et al.** *Codfish dryer optimization using CFD tools*. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro. 2006.
4. **Calisto, Hugo, Martins, Nelson e Lamas, Bruno.** *Shower Cabin for Human Drying*. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro. 2009.
5. **Wong, Shin-Yee, Zhou, Weibiao e Hua, Jinsong.** Designing process controller for a continuous bread baking. *Journal of Food Engineering*. 2006, Vol. 81, pp. 523-534.
6. **Trott, A. R. e Welch, T.** *Refrigeration and Air-Conditioning*. Woburn : Butterworth Heinemann, 2000. Vol. III.
7. **Sá, André Fernando Ribeiro de.** *Guia da aplicações de gestão de energia e eficiência energética*. Porto : Publindústria, Publicação de Comunicação, Lda, 2008.
8. **Incropera, Frank P. e Dewitt, David P.** *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. [trad.] Carlos A. B. da Silva. s.l. : LTC, 2008.
9. **Moran, Michael J. e Shapiro, Howard N.** *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. West Sussex : John Wiley & Sons, Inc, 2006. Vol. V.
10. **Diatosta - Indústria alimentar S.A.** [Online] Opinion Maker, 2009. [Citação: 16 de Maio de 2009.] [www.diatosta.pt](http://www.diatosta.pt).
11. **Bourne, Malcolm.** *Food Texture and Viscosity*. 2ª Edição. New York, U.S.A. : Food Science and Technology, 2002.
12. **P.D., Ribotta e Le, Bail A.** Thermo-physical and termo-mechanical assessment of partially baked bread during chilling and freezin process. Impact of selected enzymes on crumb contraction to prevent crust flaking. *Journal of Food Engineering*. 2007, Vol. 78, pp. 913-921.
13. **Chinachoti, Pavinee e Vodovotz, Yael.** *Bread Staling*. N.Y. : CRC Press LLC, 2001.
14. **Scanlon, M.G. e Zghal, M.C.** Bread properties and crumb struture. *Food Research international*. 2001, pp. 841-864.
15. **Zanoni, B., Peri, C e Gianotti, R.** Determination of the termal diffusivity of bread as a function of porosity. *Journal of Food Engineering*. 26, 1995, pp. 497-510.

16. Solidworks Corp. *Dassault Systèmes*. [Online] 2009. [Citação: 19 de Maio de 2009.] <http://www.solidworks.com>.

17. *Ansys, Inc.* [Online] 2009. [Citação: 19 de Maio de 2009.] <http://www.ansys.com/>.

**Anexos**

## Anexos

### 8.1. Anexo A

#### 8.1.1. Câmara de refrigeração

Tabela 28 – Dados da câmara de refrigeração

Elementos	Unidades	Nomenclatura	Valor
Comprimento interior	[m]	$C_i$	16,1
Largura interior	[m]	$l_i$	6,2
Altura interior mínima	[m]	$a_{imin}$	3
Altura interior máxima	[m]	$a_{imax}$	3,3
Área da base interior	[m <sup>2</sup> ]	$A_{bi}$	99,8
Volume interior	[m <sup>3</sup> ]	$V_i$	314
Temperatura média interior	[°C]	$T_i$	7,4
Temperatura exterior	[°C]	$T_e$	Valor variável
% H.R. interior média	[%]	$H.R._i$	87,7
% H.R. exterior	[%]	$H.R._e$	Valor variável

#### 8.1.2. Carrinho de armazenamento do pão

Tabela 29 – Dados do carrinho de armazenamento do pão de forma

Elementos	Unidades	Nomenclatura	Valor
Comprimento exterior	[m]	$C_{ce}$	1,39
Largura exterior	[m]	$l_{ce}$	0,76
Altura exterior	[m]	$a_{ce}$	1,75
Comprimento do perfil	[mm]	$C_c$	30
Largura do perfil	[mm]	$l_c$	30
Espessura	[mm]	$e_c$	3
Altura entre cada tabuleiro	[mm]	$a_{ct}$	90,2
N.º de horas na câmara de refrigeração mínimas	[h]	$h_{max}$	6
N.º de horas na câmara de refrigeração máximas	[h]	$h_{min}$	8
Massa	[kg]	$M$	52
Massa volúmica	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho$	2750
Calor específico	[J.Kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$C_p$	885
Difusividade térmica	[m.s <sup>-2</sup> ]	$\alpha$	7,5E+07
Condutividade térmica	[W.m <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$K$	177

### 8.1.3. Tabuleiro

Tabela 30 – Dados do tabuleiro do pão

Elementos	Unidades	Nomenclatura	Valor
Comprimento	[m]	$c_t$	0,75
Largura	[m]	$l_t$	0,42
Altura	[m]	$a_t$	7,00E-03
Comprimento da rede interior	[mm]	$c_{ti}$	23
Largura da rede interior	[mm]	$l_{ti}$	22
Altura da rede interior	[mm]	$a_{ti}$	3
Massa	[kg]	$m$	1,88
Número de pão de forma por tabuleiro		10	
Número de mini pão de forma por tabuleiro		17	

### 8.1.4. Pão de forma

Tabela 31 – Dados do pão

Elementos	Unidades	Nomenclatura	Valor
Comprimento	[mm]	$c$	391
Largura	[mm]	$l$	66
Altura	[mm]	$a$	81
Área da superfície	[m <sup>2</sup> ]	$A_s$	0,126
Volume	[m <sup>3</sup> ]	$V$	2,10E-03
Temperatura interior quando sai do forno	[°C]	$T_{i1}$	78
Temperatura interior quando entra na câmara de refrigeração	[°C]	$T_{i2}$	28
Temperatura interior quando sai da câmara de refrigeração	[°C]	$T_{i3}$	6
Temperatura da superfície quando sai do forno	[°C]	$T_{s1}$	74,94
Temperatura da superfície quando entra na câmara de refrigeração	[°C]	$T_{s2}$	29
Temperatura da superfície quando sai da câmara de refrigeração (Após 6hrs)	[°C]	$T_{s3}$	13,38
Massa quando sai do forno	[g]	$m_1$	441,65
Massa quando entra na câmara de refrigeração	[g]	$m_2$	424,71
Massa quando sai da câmara de refrigeração	[g]	$m_3$	424,00
Massa volúmica quando sai do forno	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_1$	211
Massa volúmica quando entra na câmara de refrigeração	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_2$	203
Massa volúmica quando sai da câmara de refrigeração	[Kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_3$	202
Calor específico	[J.Kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$C_{p1}$	2590
Difusividade térmica	[m.s <sup>-2</sup> ]	$\alpha_1$	1,36E-07
Condutividade térmica	[W.m <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$K_1$	0,156

## 8.1.5. Mini pão

Tabela 32 – Dados do mini pão

Elementos	Unidades	Nomenclatura	Valor
Comprimento	[m]	$c_m$	4,00E-01
Largura	[m]	$l_m$	4,50E-02
Altura	[m]	$a_m$	4,50E-02
Área da superfície	[m <sup>2</sup> ]	$A_{sm}$	7,61E-02
Volume	[m <sup>3</sup> ]	$V_m$	8,10E-04
Massa quando sai do forno	[kg]	$m_1$	1,13E-01
Massa quando entra na câmara de refrigeração	[kg]	$m_2$	1,10E-01
Calor específico	[J.Kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$C_{p1}$	2,59E+03
Difusividade térmica	[m.s <sup>-2</sup> ]	$\alpha_1$	1,36E-07
Condutividade térmica	[W.m <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ]	$K_1$	1,56E-01

## 8.1.6. Evaporador (Centauro - Modelo DD-746)

Tabela 33 – Dados da ventoinha do evaporador

Diâmetro Externo [m]	Diâmetro Interno [m]	Área útil [m <sup>2</sup> ]	Caudal Volúmico individual [m <sup>3</sup> /s]	Potência [W]
0,35	0,08	0,36	2,18	120

Tabela 34 – Dados finais do evaporador

N.º de ventoinhas	Caudal Volúmico [m <sup>3</sup> /s]	Caudal mássico [kg/s]	Potência total [kW]
5	10,92	13,70	0,6

## 8.2. Anexo B

Tabela 35 – Registo do controlo de refrigeração do dia 24-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:			24-03-2009			
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
1:15	5	70	9	88	5	0:45
2:00	5	70	10	97	5	1:15
3:15	5	70	12	99	5	0:30
3:45	5	70	13	83	5	0:50
4:35	5	70	12	87	5	0:45
5:20	5	70	12	78	5	0:55
6:15	5	70	11	81	5	0:50
7:05	5	70	12	89	5	0:45
7:50	5	70	15	97	10	1:45
9:35	5	70	14	82	5	1:05
10:40	5	70	12	83	5	1:55
12:35	5	70	13	93	15	1:15
13:50	5	70	12	78	5	0:25
14:15	5	70	11	75		0:20
14:35	5	70	12	84	5	1:25
16:00	5	70	13	86	5	1:35
17:35	5	70	10	70		0:50
18:25	5	70	13	75	9	1:35
20:00	5	70	10	77	6	0:10
20:10	5	70	9	69		2:50
23:00	5	70	6	78		
Valor médio			11,48	83,29		1:05
Total de carrinhos com pão no dia				105		



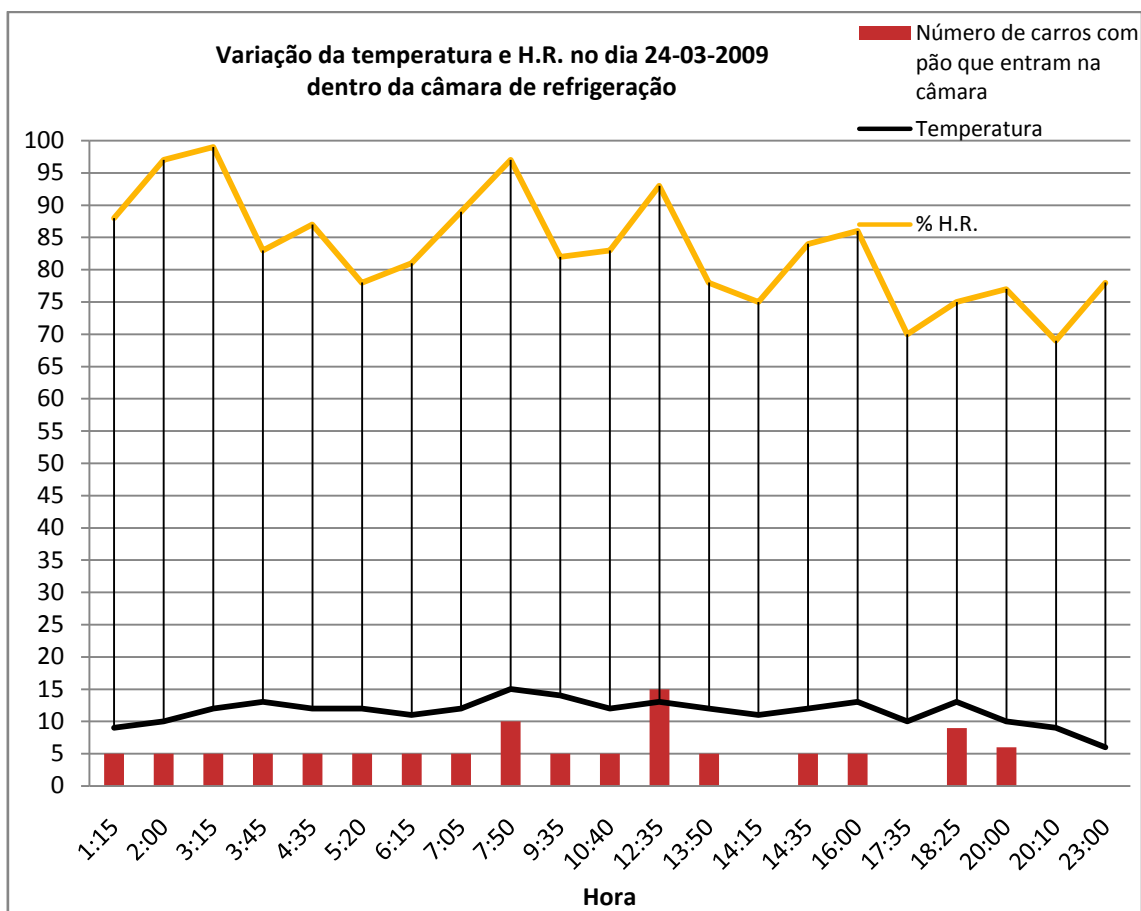


Figura 100 – Variação da temperatura e humidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 36 - Registo do controlo de refrigeração do dia 25-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:			25-03-2009			
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
1:30	8	80	12	88	5	0:45
2:15	8	80	10	71	5	1:05
3:20	8	80	11	85	5	0:40
4:00	8	80	10	73	5	0:55
4:55	8	80	12	89	10	1:45
6:40	8	80	14	96	10	2:00
8:40	8	80	13	74	10	3:40
12:20	8	80	13	77	15	2:15
14:35	8	80	6	81		3:00
17:35	5	70	11	90	9	2:35
20:10	5	70	11	91	8	0:20
20:30	5	70	11	80	5	2:40
23:10	5	70	10	79	8	
Valor médio			11,08	82,62		1:48
Total de carros com pão no dia				95		

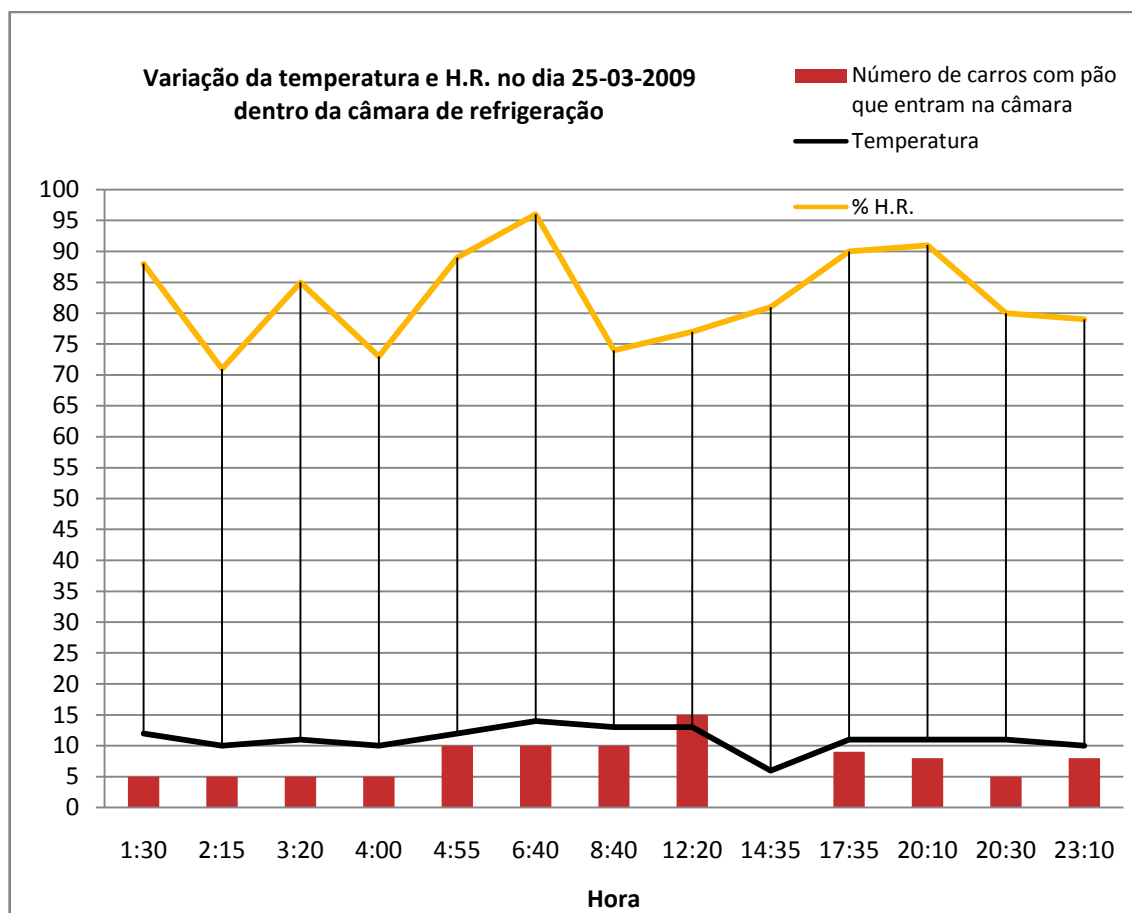


Figura 101 - Variação da temperatura e humidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 37 - Registo do controlo de refrigeração do dia 26-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:		26-03-2009				
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
1:20	5	70	7	73		2:40
4:00	5	70	5	70		3:00
7:00	5	70	8	81	5	0:45
7:45	5	70	8	78	5	1:00
8:45	5	70	16	100	10	1:45
10:30	5	70	11	89	10	2:30
13:00	5	70	13	100	10	1:25
14:25	5	70	12	68	10	3:20
17:45	5	70	8	78	13	2:05
19:50	5	70	13	80	16	0:35
20:25	5	70	9	73		2:25
22:50	5	70	6	73		
Valor médio			9,67	80,25		1:57
Total de carros com pão no dia				79		

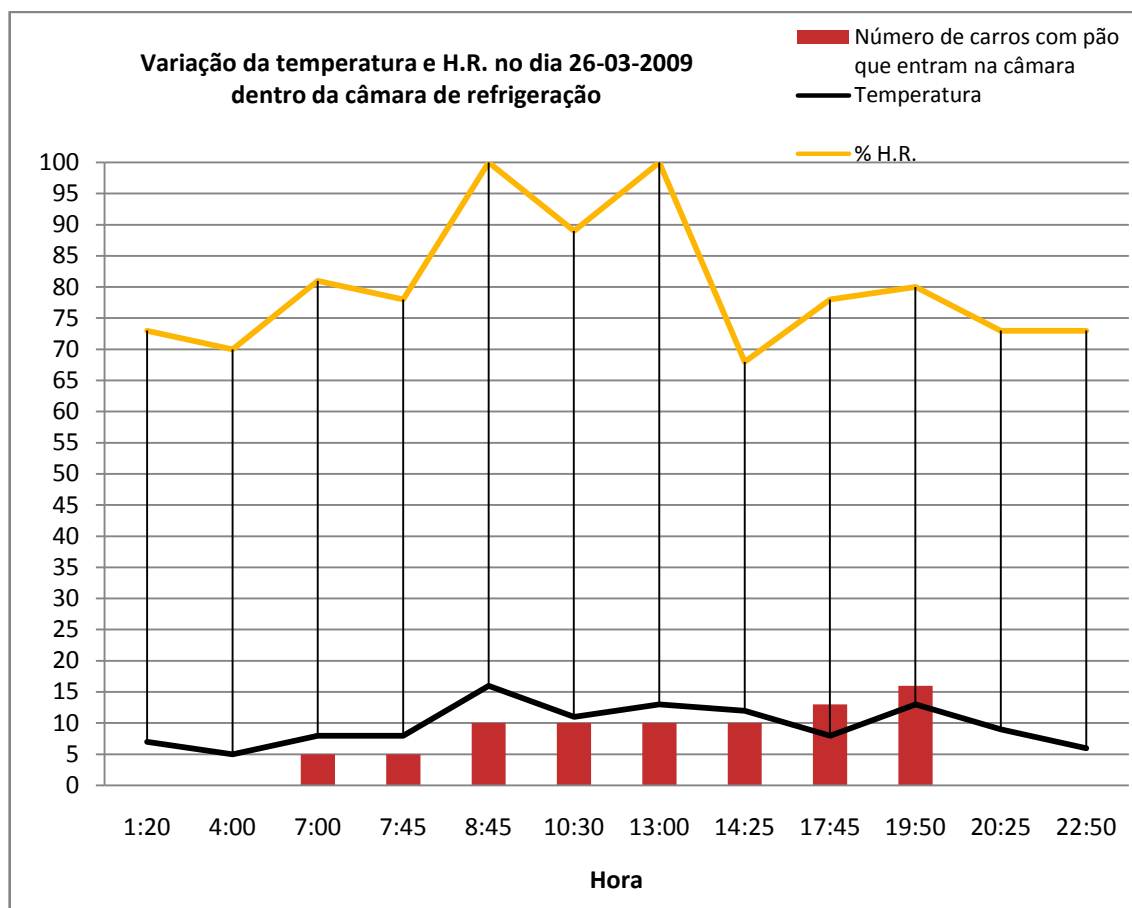


Figura 102 – Variação da temperatura e humidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 38 - Registo do controlo de refrigeração do dia 27-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:			27-03-2009			
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
1:20	5	70	6	81		2:40
4:00	5	70	6	81		0:35
4:35	5	70	8	89	5	0:20
4:55	5	70	9	86	5	1:35
6:30	5	70	9	87	10	2:30
9:00	5	70	10	89	15	1:45
10:45	5	70	10	84	10	3:40
14:25	5	70	11	79	11	3:20
17:45	5	70	8	83		0:35
18:20	5	70	6	85	15	0:40
19:00	5	70	13	77	15	1:25
20:25	5	70	8	73		1:55
22:20	5	70	6	76		
Valor médio			8,46	82,31		1:45
Total de carros com pão no dia				86		

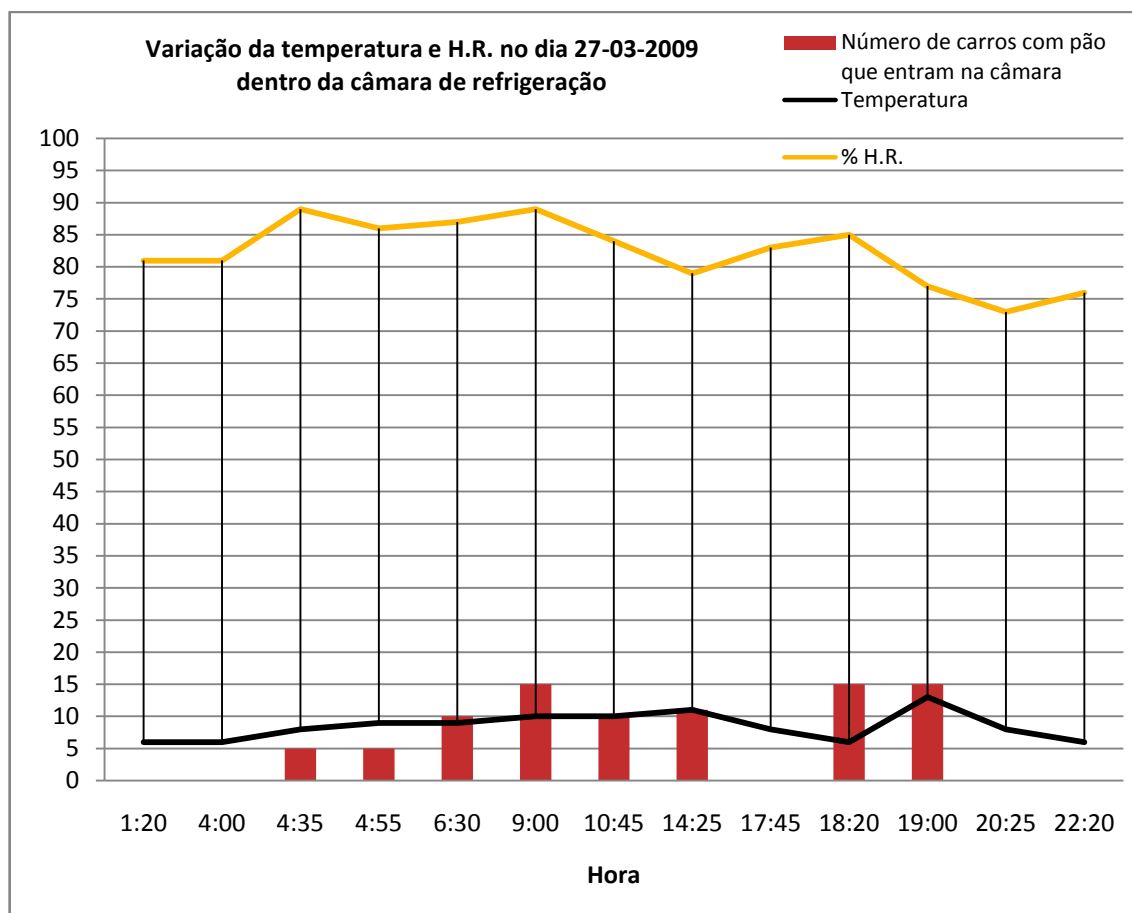


Figura 103 – Variação da temperatura e humidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 39 - Registo do controlo de refrigeração do dia 24-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:		28-03-2009				
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
1:20	5	70	6	79		0:55
2:15	5	70	8	84	5	1:15
3:30	5	70	8	82	5	0:35
4:05	5	70	8	86	5	0:50
4:55	5	70	12	98	5	1:50
6:45	5	70	10	90	10	1:45
8:30	5	70	11	88	10	0:45
9:15	5	70	6	81		2:15
11:30	8	60	5	78		0:40
12:10	8	60	15	76	20	
Valor médio			8,90	84,20		1:12
Total de carros com pão no dia				60		

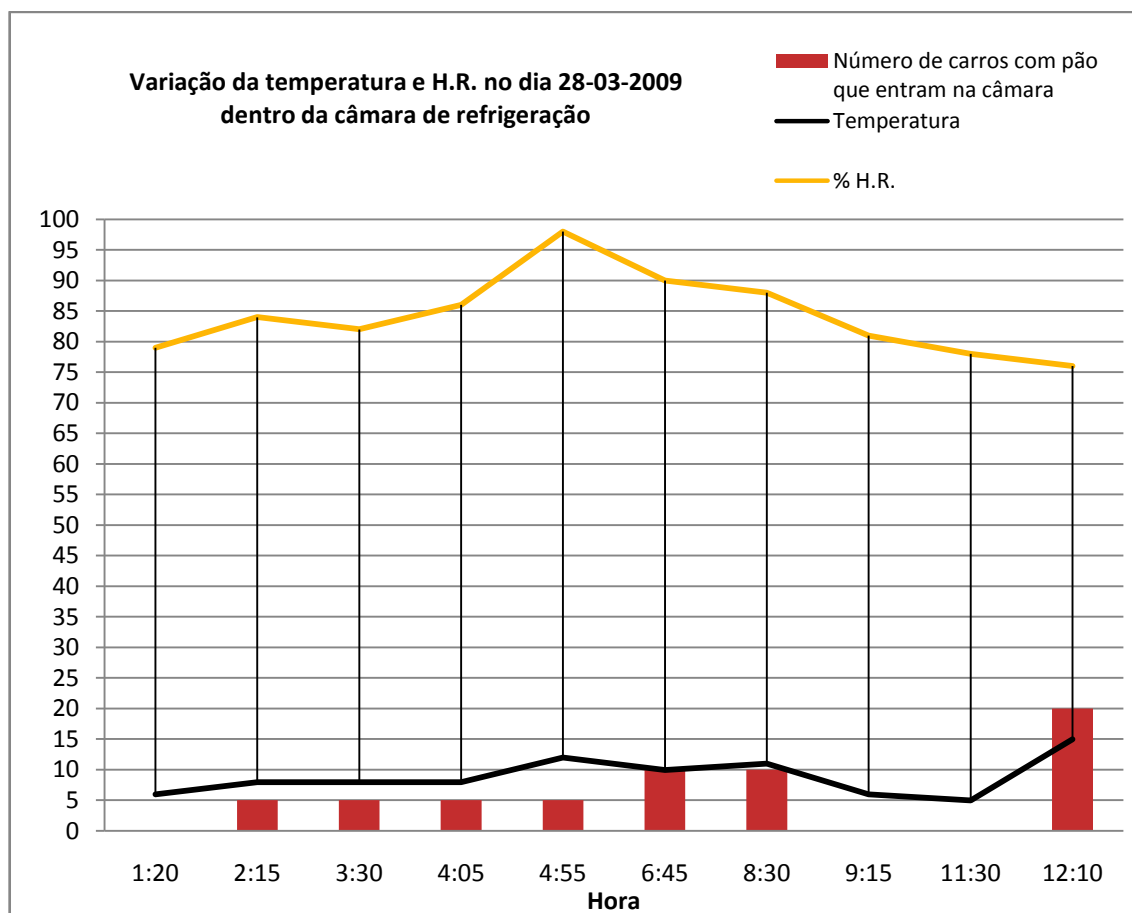


Figura 104 – Variação da temperatura e humidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 40 - Registo do controlo de refrigeração do dia 29-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:		29-03-2009				
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
22:50	8	60	9	69		
Valor médio			9,00	69,00		
Total de carros com pão no dia				0		

Tabela 41 - Registo do controlo de refrigeração do dia 30-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:		30-03-2009				
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
1:15	5	70	11	85	5	0:35
1:50	5	70	8	81	5	0:10
2:00	5	70	11	78	5	1:00
3:00	5	70	9	89	5	1:10
4:10	5	70	6	73		0:40
4:50	5	70	6	73	6	1:55
6:45	5	70	9	88	10	1:00
7:45	5	70	12	99	10	4:15
12:00	5	70	12	72	21	2:30
14:30	5	70	6	68		2:55
17:25	5	70	12	97	10	1:05
18:30	5	70	7	77		1:00
19:30	5	70	12	82	5	1:00
20:30	5	70	7	73		0:20
20:50	5	70	8	83	6	0:45
21:35	5	70	9	82	5	1:05
22:40	5	70	9	80	5	0:40
23:20	5	70	8	84	5	
Valor médio			9,00	81,33		1:17

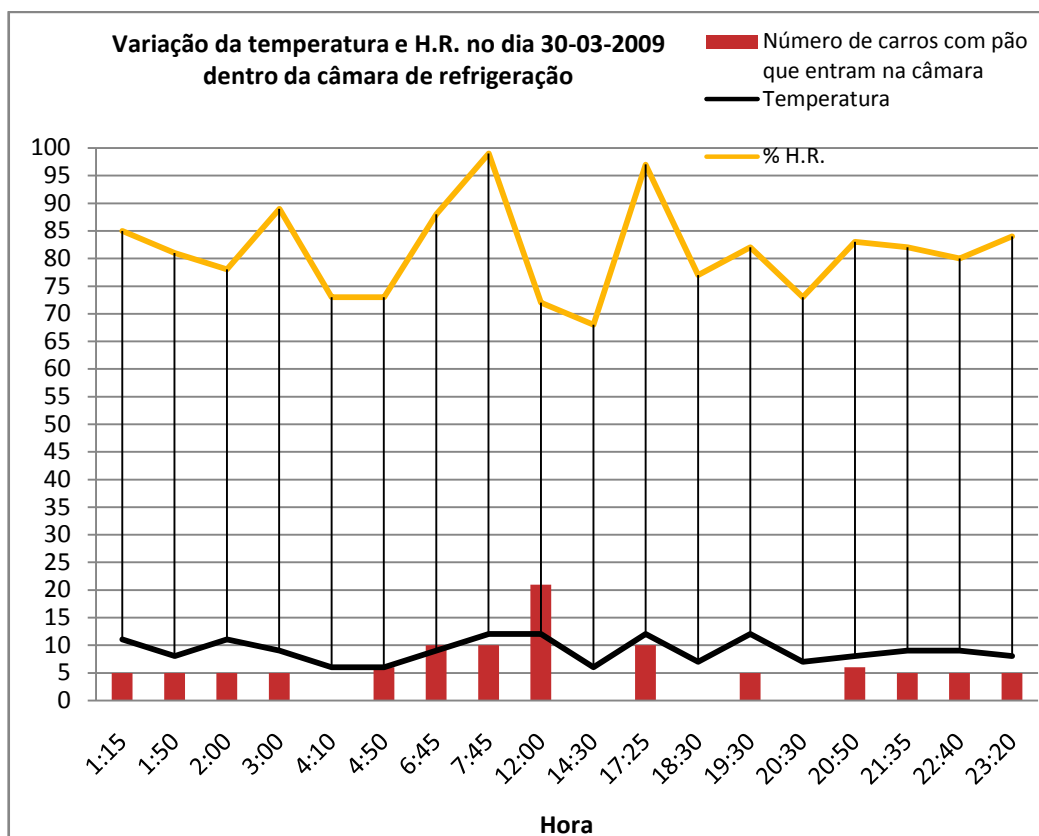


Figura 105 – Variação da temperatura e humidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 42 - Registo do controlo de refrigeração do dia 31-09-2009

Câmara de refrigeração N.º 3 (POLO 2)						
DATA:		31-03-2009				
Hora	Valores impostos		Valores reais		Entrada de carrinhos	Tempo entre cada registo
	Temperatura [°C]	HR [%]	Temperatura [°C]	HR [%]		
0:05	5	70	8	70	5	1:10
1:15	5	70	6	75	5	0:35
1:50	5	70	9	76	5	1:05
2:55	5	70	9	77	5	0:40
3:35	5	70	11	80	5	0:25
4:00	5	70	11	70		0:35
4:35	5	70	10	75	5	1:10
5:45	5	70	15	100	5	4:25
10:10	5	70	11	75	16	0:40
10:50	5	70	11	75	7	5:45
16:35	5	70	8	79	5	0:55
17:30	5	70	9	89	5	1:00
18:30	5	70	9	92	5	1:15
19:45	5	70	12	95	11	3:05
22:50	5	70	6	75		
Valor médio			9,67	80,20		1:37
Total de carros com pão no dia				84		

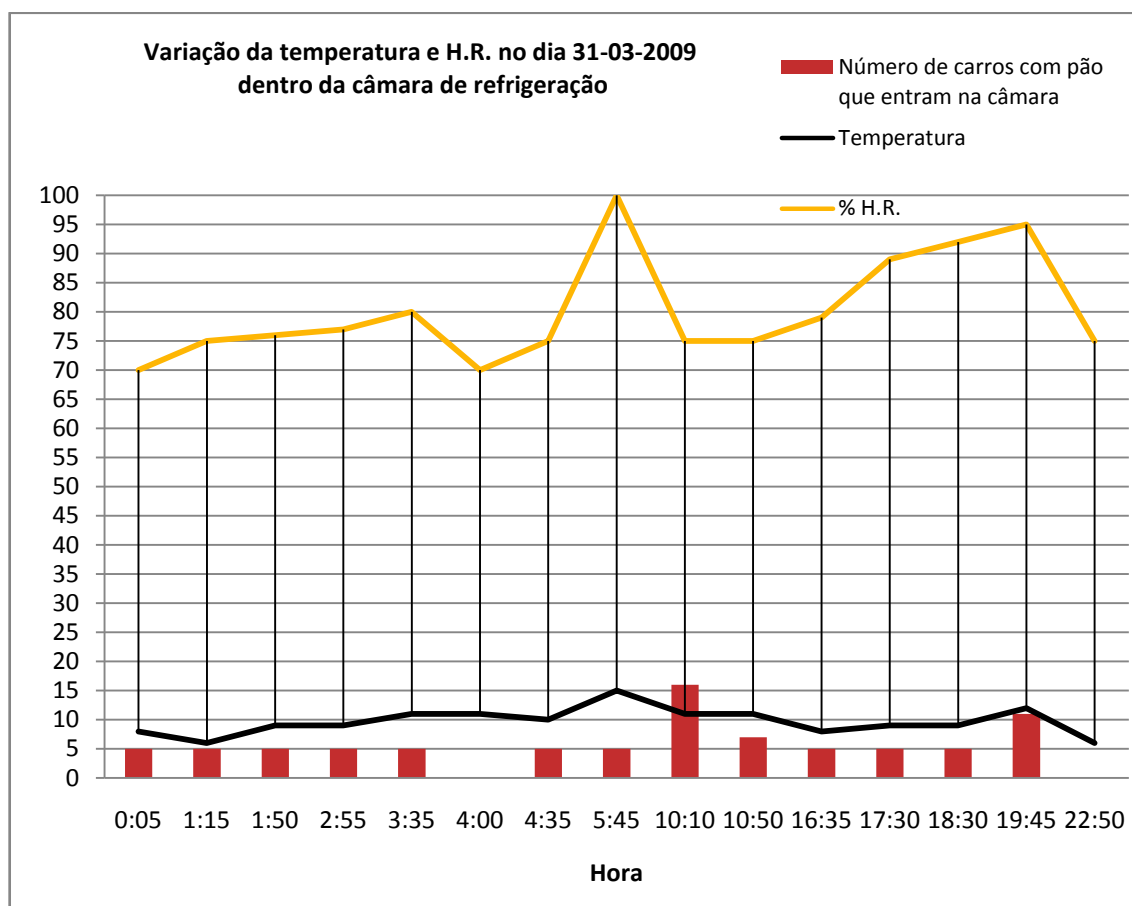


Figura 106 – Variação da temperatura e umidade com a reposição dos carrinhos de pão

Tabela 43 – Número de carrinhos e abertura das portas por dia

Média de carrinhos que entram na câmara por dia [Carrinho/dia]	77
Média do número de vezes que a porta de entrada é aberta (mínimo)	15
Média do número de vezes que a porta de saída é aberta (mínimo)	87



### 8.3. Anexo C

Tabela 44 – Valores médios registados pelo “*data logger*” ente 25-03-2009 a 30-03-2009

Temperatura média de todos os dados recolhidos	[°C]	7,4
Humidade relativa média	[%]	87,7

## 8.4. Anexo D

## 8.4.1. Estudo 2

Tabela 45 – Temperaturas obtidas no estudo 2.1

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 2.1	4	1	14,60	14,66	14,77	14,85	14,65	13,70
		2	14,52	14,55	14,62	13,73	13,69	12,52
		3	14,77	14,75	14,90	13,58	13,57	13,39
		4	15,03	15,17	15,20	15,25	15,41	14,62
		Temp. Mín.	8,31	7,73	7,23	6,96	6,78	6,64
		Temp. Máx.	15,14	15,25	15,33	16,39	16,91	16,18
	6	1	10,94	10,97	11,04	10,91	10,82	10,26
		2	10,91	10,92	10,97	9,95	9,94	9,29
		3	11,07	11,06	11,16	10,27	10,37	10,08
		4	11,22	11,29	11,33	11,03	11,20	10,62
		Temp. Mín.	6,75	6,60	6,55	6,52	6,61	6,56
		Temp. Máx.	11,30	11,37	11,42	12,26	12,40	11,72
	8	1	8,85	8,86	8,90	8,96	8,80	8,52
		2	8,84	8,84	8,87	8,26	8,14	7,82
		3	8,94	8,93	8,98	8,61	8,56	8,34
		4	9,00	9,02	9,06	8,59	8,83	8,41
		Temp. Mín.	6,69	6,67	6,67	6,63	6,61	6,58
		Temp. Máx.	9,06	9,09	9,11	10,00	9,58	9,12
	N.º elementos		191028	222877	262864	372470	482987	809219
	Acréscimo de elementos			17%	18%	42%	30%	68%

Tabela 46 – Temperaturas obtidas no estudo 2.2

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 2.2	4	1	16,55	16,63	16,35	20,12	20,02	19,62
		2	16,69	16,85	15,96	17,85	19,91	17,28
		3	16,70	16,73	17,01	19,94	19,67	19,97
		4	16,65	16,42	16,44	19,25	20,15	19,80
		Temp. Mín.	8,35	7,83	7,30	6,71	6,59	6,65
		Temp. Máx.	17,33	17,39	18,05	22,57	23,03	22,76
	6	1	12,78	12,85	12,68	16,71	16,06	16,37
		2	12,67	12,83	12,20	14,16	15,56	13,82
		3	12,69	12,79	13,01	15,50	15,13	16,46
		4	12,71	12,60	12,60	14,80	15,71	15,25
		Temp. Mín.	6,80	6,68	6,61	6,46	6,52	6,49
		Temp. Máx.	13,13	13,23	13,96	18,50	18,61	19,26
	8	1	10,27	10,34	10,23	13,85	13,37	13,26
		2	10,07	10,19	9,80	11,40	12,32	11,14
		3	10,10	10,19	10,33	12,63	11,87	12,79
		4	10,14	10,10	10,08	11,88	12,82	12,29
		Temp. Mín.	6,74	6,73	6,71	6,51	6,51	6,50
		Temp. Máx.	10,45	10,56	11,00	14,24	14,48	14,28
	N.º elementos		689436	862698	1077709	1791216	2478065	4729773
	Acréscimo de elementos			25%	25%	66%	38%	91%

Tabela 47 – Temperaturas obtidas no estudo 2.3

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 2.3	4	1	14,85	14,97	15,07	11,45	11,96	9,95
		2	15,76	16,00	16,34	13,64	14,25	10,19
		3	15,66	16,14	16,71	14,61	15,12	10,28
		4	15,72	16,39	16,74	13,72	13,99	10,72
		Temp. Mín.	8,34	7,74	7,22	6,58	6,56	7,76
		Temp. Máx.	16,39	16,67	16,84	14,76	15,43	11,72
	6	1	11,33	11,39	11,46	7,87	8,13	
		2	12,05	12,20	12,43	9,15	9,48	
		3	12,06	12,36	12,77	9,90	10,23	
		4	12,12	12,57	12,83	9,39	9,55	
		Temp. Mín.	6,84	6,67	6,60	6,38	6,33	
		Temp. Máx.	12,48	12,90	12,88	9,98	10,48	
	8	1	9,23	9,26	9,28	6,75	6,83	
		2	9,73	9,80	9,93	7,19	7,31	
		3	9,76	9,94	10,17	7,52	7,67	
		4	9,82	10,08	10,22	7,36	7,43	
		Temp. Mín.	6,72	6,70	6,68	6,37	6,37	
		Temp. Máx.	9,98	10,27	10,25	7,54	7,78	
	N.º elementos		796242	997752	1288608	2124605	3035019	5845612
	Acréscimo de elementos			25%	29%	65%	43%	93%

#### 8.4.2. Estudo 3

Tabela 48 – Temperaturas obtidas no estudo 3.1

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 3.1	4	1	14,51	14,512	14,47	10,17	10,25	8,95
		2	14,63	14,61	14,71	10,68	10,79	9,45
		3	14,54	14,62	14,93	10,56	11,04	10,68
		4	14,95	14,95	15,11	11,75	12,03	10,61
		Temp. Mín.	8,20	7,63	7,11	6,49	6,44	6,37
		Temp. Máx.	15,03	14,97	15,13	14,71	12,19	11,10
	6	1	10,86	10,87	10,83	7,10	7,14	6,54
		2	10,96	10,97	11,02	7,27	7,34	6,76
		3	10,92	10,99	11,20	7,37	7,64	7,50
		4	11,20	11,23	11,35	7,97	8,26	7,56
		Temp. Mín.	6,68	6,54	6,48	6,29	6,22	6,16
		Temp. Máx.	11,25	11,25	11,38	10,98	8,32	7,85
	8	1	8,80	8,81	8,77	6,46	6,46	6,41
		2	8,88	8,89	8,91	6,46	6,49	6,44
		3	8,86	8,91	9,01	6,57	6,66	6,66
		4	9,02	9,05	9,12	6,73	6,88	6,71
		Temp. Mín.	6,65	6,63	6,62	6,31	6,30	6,40
		Temp. Máx.	9,05	9,07	9,14	8,81	6,97	6,99
	N.º elementos		204808	238067	278775	392598	497147	827514
	Acréscimo de elementos			16%	17%	41%	27%	66%

Tabela 49 – Temperaturas obtidas no estudo 3.2

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 3.2	4	1	15,38	15,87	15,77	12,49	12,88	11,75
		2	17,07	17,45	17,59	15,46	16,41	15,02
		3	17,12	17,78	18,29	17,05	17,32	15,79
		4	16,57	16,93	17,57	15,37	7,07	15,76
		Temp. Mín.	8,61	8,14	7,61	6,96	6,88	6,84
		Temp. Máx.	17,32	18,16	18,41	17,35	17,52	17,44
	6	1	11,73	12,12	12,04	8,56	8,78	7,95
		2	13,05	13,41	13,60	10,48	11,33	10,01
		3	13,13	13,70	14,19	11,58	11,95	10,48
		4	12,75	13,12	13,71	10,77	7,02	10,34
		Temp. Mín.	7,06	6,94	6,85	6,61	6,54	6,45
		Temp. Máx.	13,23	13,93	14,24	11,80	12,09	11,39
	8	1	9,49	9,77	9,71	7,09	7,18	6,84
		2	10,38	10,66	10,83	7,92	8,35	7,58
		3	10,45	10,87	11,23	8,37	8,62	7,76
		4	10,22	10,53	10,95	8,13	7,01	7,64
		Temp. Mín.	6,83	6,87	6,82	6,50	6,49	6,50
		Temp. Máx.	10,49	10,99	11,25	9,28	8,66	7,95
	N.º elementos		685928	855343	1072531	1784185	2469570	4716863
	Acréscimo de elementos			25%	25%	66%	38%	91%

Tabela 50 – Temperaturas obtidas no estudo 3.3

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 3.3	4	1	15,04	15,06	14,99	11,12	11,24	9,79
		2	15,48	15,45	15,44	11,75	11,94	9,95
		3	15,42	15,56	15,51	11,84	12,29	9,89
		4	15,65	16,17	16,00	12,59	12,48	9,87
		Temp. Mín.	8,53	7,90	7,37	6,82	6,67	6,78
		Temp. Máx.	15,81	16,32	16,49	15,86	14,13	11,72
	6	1	11,35	11,37	11,30	7,63	7,68	6,87
		2	11,75	11,75	11,73	8,06	8,20	6,94
		3	11,78	11,90	11,88	8,18	8,64	6,93
		4	11,97	12,37	12,27	8,68	8,80	6,92
		Temp. Mín.	6,93	6,73	6,66	6,46	6,38	6,34
		Temp. Máx.	12,04	12,48	12,58	11,77	9,53	7,72
	8	1	9,17	9,19	9,13	6,64	6,64	6,43
		2	9,48	9,48	9,46	6,81	6,87	6,40
		3	9,54	9,62	9,60	6,89	7,12	6,38
		4	9,68	9,92	9,86	7,08	7,20	6,37
		Temp. Mín.	6,74	6,74	6,71	6,42	6,40	6,36
		Temp. Máx.	9,72	9,99	9,99	9,28	7,35	6,97
	N.º elementos		782252	986384	1271146	2129130	3028294	5855669
	Acréscimo de elementos			26%	29%	67%	42%	93%

### 8.4.3. Estudo 4

Tabela 51 – Temperaturas obtidas no estudo 4.1

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 4.1	4	1	14,80	15,22	15,51	12,44	13,17	10,49
		2	15,65	15,54	15,60	11,80	12,28	10,44
		3	15,17	15,11	15,09	11,90	12,15	10,66
		4	14,18	14,21	14,18	10,22	10,49	9,10
		Temp. Mín.	8,25	7,67	7,15	6,55	6,50	6,42
		Temp. Máx.	15,69	15,70	15,84	12,86	13,61	11,21
	6	1	11,08	11,36	11,50	8,05	8,39	7,00
		2	11,66	11,59	11,59	7,82	8,04	7,02
		3	11,31	11,27	11,23	7,78	7,91	7,06
		4	10,63	10,66	10,62	7,05	7,17	6,56
		Temp. Mín.	6,70	6,55	6,48	6,30	6,24	6,14
		Temp. Máx.	11,69	11,68	11,75	8,24	8,62	7,19
	8	1	8,96	9,10	9,16	6,65	6,72	6,41
		2	9,29	9,24	9,22	6,61	6,66	6,41
		3	9,07	9,04	9,00	6,55	6,57	6,40
		4	8,67	8,69	8,65	6,41	6,43	6,40
		Temp. Mín.	6,64	6,63	6,61	6,30	6,29	6,32
		Temp. Máx.	9,30	9,29	9,31	6,93	6,98	7,01
	N.º elementos		294458	335398	375046	482460	592767	917031
	Acréscimo de elementos			14%	12%	29%	23%	55%

Tabela 52 – Temperaturas obtidas no estudo 4.2

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha		
			90mm	80mm	70mm
Estudo 4.2	4	1	16,56	16,98	18,24
		2	16,42	16,67	17,62
		3	15,98	15,99	17,62
		4	14,92	15,00	17,02
		Temp. Mín.	8,62	8,59	7,80
		Temp. Máx.	16,91	17,31	21,17
	6	1	12,62	12,86	15,63
		2	12,51	12,65	14,96
		3	12,14	12,12	14,37
		4	11,34	11,38	13,44
		Temp. Mín.	6,86	6,89	6,56
		Temp. Máx.	12,78	13,03	17,72
	8	1	10,10	10,24	13,32
		2	10,05	10,13	12,72
		3	9,77	9,77	12,21
		4	9,25	9,28	10,96
		Temp. Mín.	6,67	6,71	6,65
		Temp. Máx.	10,17	10,31	15,27
	N.º elementos		673483	776618	953899
	Acréscimo de elementos			15%	23%

Tabela 53 – Temperaturas obtidas no estudo 4.3

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha			
			90mm	80mm	70mm	60mm
Estudo 4.3	4	1	14,99	15,20	15,09	15,17
		2	14,76	14,95	14,90	14,97
		3	14,67	14,85	14,85	14,90
		4	14,86	15,03	14,98	15,08
		Temp. Mín.	8,60	8,46	7,80	7,28
		Temp. Máx.	16,06	16,50	16,17	16,43
	6	1	11,35	11,50	11,44	11,46
		2	11,15	11,32	11,27	11,30
		3	11,06	11,22	11,20	11,22
		4	11,15	11,31	11,24	11,29
		Temp. Mín.	6,85	6,84	6,62	6,56
		Temp. Máx.	12,04	12,31	12,15	12,28
	8	1	9,20	9,30	9,25	9,24
		2	9,06	9,18	9,14	9,13
		3	8,99	9,11	9,08	9,07
		4	9,02	9,13	9,08	9,09
		Temp. Mín.	6,68	6,70	6,67	6,65
		Temp. Máx.	9,58	9,75	9,66	9,71
	N.º elementos		771154	879222	1086400	1378262
	Acréscimo de elementos			14%	24%	27%

## 8.4.4. Estudo 5

Tabela 54 – Temperaturas obtidas no estudo 5.1

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha				
			8mm	5mm	4mm	3mm	2mm
Estudo 5.1	4	1	4,19	4,82	4,81	4,77	5,18
		2	4,38	5,06	5,17	5,17	5,73
		3	4,37	4,90	5,04	4,98	5,57
		4	4,13	4,53	4,74	4,76	5,34
		Temp. Mín.	3,34	3,30	3,29	3,38	3,50
		Temp. Máx.	4,45	5,22	5,27	5,21	5,84
	6	1	3,81	3,93	3,95	3,94	4,06
		2	3,84	4,00	4,06	4,04	4,23
		3	3,85	3,94	4,02	3,97	4,17
		4	3,79	3,84	3,90	3,87	4,05
		Temp. Mín.	3,77	3,79	3,80	3,78	3,86
		Temp. Máx.	4,00	4,04	4,08	4,05	4,25
	8	1	3,94	3,94	3,94	3,94	3,96
		2	3,94	3,94	3,95	3,94	3,98
		3	3,94	3,93	3,94	3,93	3,97
		4	3,94	3,93	3,93	3,92	3,94
		Temp. Mín.	3,93	3,93	3,93	3,91	3,94
		Temp. Máx.	4,00	4,00	4,01	4,00	4,00
	N.º elementos		495039	935651	1241225	1846118	4152087
	Acréscimo de elementos			89%	33%	49%	125%

Tabela 55 – Temperaturas obtidas no estudo 5.2

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			8mm	5mm	4mm	3mm	2mm	1mm
Estudo 5.2	4	1	3,61	3,70	3,67	3,90	3,93	3,83
		2	3,53	3,58	3,57	3,73	3,78	3,67
		3	3,50	3,55	3,53	3,66	3,71	3,64
		4	3,54	3,64	3,56	3,69	3,70	3,68
		Temp. Mín.	3,30	3,29	3,24	3,34	3,32	3,33
		Temp. Máx.	3,96	3,96	3,94	4,02	4,06	3,99
	6	1	3,72	3,75	3,73	3,76	3,82	3,77
		2	3,75	3,75	3,74	3,77	3,82	3,77
		3	3,77	3,77	3,75	3,78	3,82	3,78
		4	3,81	3,81	3,78	3,80	3,83	3,80
		Temp. Mín.	3,71	3,74	3,72	3,76	3,80	3,75
		Temp. Máx.	4,00	4,00	3,99	3,99	4,00	4,00
	8	1	3,95	3,95	3,94	3,94	3,96	3,94
		2	3,97	3,96	3,95	3,95	3,97	3,95
		3	3,97	3,97	3,96	3,96	3,97	3,96
		4	3,98	3,97	3,97	3,96	3,98	3,97
		Temp. Mín.	3,94	3,95	3,94	3,94	3,96	3,94
		Temp. Máx.	4,01	4,01	4,01	4,00	4,01	4,00
	N.º elementos		526581	1043947	1480122	2136013	5233031	6326040
	Acréscimo de elementos			98%	42%	44%	145%	21%

Tabela 56 – Temperaturas obtidas no estudo 5.3

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			30mm	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm
Estudo 5.3	4	1	8,10	7,76	8,00	8,00	8,00	8,00
		2	8,26	8,02	8,25	8,26	8,25	8,25
		3	7,78	7,42	7,48	7,48	7,47	7,47
		4	6,32	5,83	5,76	5,76	5,76	5,76
		Temp. Mín.	3,86	3,82	3,80	3,80	3,80	3,80
		Temp. Máx.	8,62	8,29	8,57	8,57	8,57	8,56
	6	1	5,23	5,01	5,24	5,24	5,24	5,24
		2	5,31	5,23	5,44	5,44	5,44	5,44
		3	5,02	4,91	4,99	4,99	4,99	4,99
		4	4,38	4,24	4,23	4,23	4,23	4,23
		Temp. Mín.	3,96	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93
		Temp. Máx.	5,48	5,34	5,60	5,61	5,60	5,60
	8	1	4,31	4,23	4,31	4,31	4,31	4,31
		2	4,33	4,31	4,39	4,39	4,39	4,39
		3	4,21	4,19	4,23	4,23	4,23	4,23
		4	4,03	4,01	4,02	4,02	4,02	4,02
		Temp. Mín.	3,99	3,97	3,98	3,98	3,98	3,98
		Temp. Máx.	4,38	4,34	4,42	4,42	4,42	4,42
	N.º elementos		183293	199178	203516	203516	203516	203516
	Acréscimo de elementos			9%	2%	0%	0%	0%

## 8.4.5. Estudo 6

Tabela 57 – Temperaturas obtidas no estudo 6.1

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha					
			80mm	70mm	60mm	50mm	40mm	30mm
Estudo 6.1	4	1	14,99	15,09	15,04	11,47	11,40	9,69
		2	14,94	15,10	14,96	11,29	11,41	9,71
		3	14,89	14,93	14,81	11,40	11,50	9,63
		4	15,30	15,01	14,91	11,21	11,64	9,56
		Temp. Mín.	8,32	7,76	7,23	6,59	6,54	6,44
		Temp. Máx.	15,47	15,42	15,34	12,42	12,52	10,50
	6	1	11,19	11,27	11,22	7,64	7,62	6,77
		2	11,17	11,29	11,19	7,60	7,66	6,77
		3	11,14	11,18	11,09	7,59	7,65	6,74
		4	11,42	11,24	11,16	7,53	7,73	6,69
		Temp. Mín.	6,75	6,61	6,53	6,34	6,28	6,13
		Temp. Máx.	11,52	11,48	11,40	8,02	8,09	7,05
	8	1	9,00	9,04	9,00	6,57	6,57	6,43
		2	9,00	9,07	8,99	6,57	6,58	6,40
		3	8,99	9,02	8,95	6,52	6,54	6,38
		4	9,15	9,05	8,99	6,51	6,56	6,34
		Temp. Mín.	6,66	6,67	6,63	6,31	6,29	6,29
		Temp. Máx.	9,21	9,18	9,09	6,94	6,97	7,00
	N.º elementos		297410	336166	378157	501009	595854	920017
	Acréscimo de elementos			13%	12%	32%	19%	54%

Tabela 58 – Temperaturas obtidas no estudo 6.2

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha			
			80mm	70mm	60mm	50mm
Estudo 6.2	4	1	17,29	17,22	17,94	14,18
		2	16,93	17,14	17,11	13,30
		3	16,43	16,50	16,56	13,10
		4	15,73	15,83	15,89	12,15
		Temp. Mín.	8,72	8,20	7,61	6,75
		Temp. Máx.	17,48	17,91	18,02	14,86
	6	1	13,36	13,38	14,15	9,50
		2	13,17	13,38	13,66	9,31
		3	12,71	12,83	13,02	9,00
		4	12,11	12,22	12,31	8,34
		Temp. Mín.	6,99	6,81	6,68	6,41
		Temp. Máx.	13,47	13,92	14,26	10,56
	8	1	10,71	10,70	11,30	7,42
		2	10,70	10,79	11,14	7,52
		3	10,35	10,41	10,63	7,30
		4	9,88	9,93	10,03	6,94
		Temp. Mín.	6,73	6,71	6,69	6,37
		Temp. Máx.	10,84	11,08	11,41	8,57
	N.º elementos		764636	943580	1158227	1869186
	Acréscimo de elementos			23%	23%	61%



Tabela 59 – Temperaturas obtidas no estudo 6.3

	Timestep [h]	Ponto	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha			
			80mm	70mm	60mm	50mm
Estudo 6.3	4	1	15,02	15,12	15,34	11,77
		2	15,05	15,26	15,33	11,77
		3	14,84	14,97	15,09	11,73
		4	14,69	14,79	14,92	11,22
		Temp. Mín.	8,38	7,77	7,25	6,61
		Temp. Máx.	15,75	15,87	16,07	15,32
	6	1	11,46	11,52	11,64	7,96
		2	11,48	11,59	11,62	7,96
		3	11,28	11,35	11,41	7,88
		4	11,10	11,16	11,24	7,64
		Temp. Mín.	6,75	6,56	6,49	6,35
		Temp. Máx.	11,81	11,95	12,03	11,41
	8	1	9,30	9,33	9,37	6,71
		2	9,30	9,35	9,35	6,72
		3	9,15	9,18	9,20	6,66
		4	9,01	9,04	9,06	6,61
		Temp. Mín.	6,65	6,63	6,62	6,34
		Temp. Máx.	9,51	9,61	9,65	9,09
	N.º elementos		852850	1062158	1348364	2210793
	Acréscimo de elementos			25%	27%	64%

#### 8.4.6. Estudo 7

Tabela 60 – Temperaturas obtidas no estudo 7

ESTUDO	Timestep [h]	Temperatura	Temperatura [°C] para cada tamanho mínimo da malha				
			100mm	90mm	80mm	70mm	60mm
7.1 - Inlet 15°C	1	Mínima	14,99	15,20	15,00	15,20	15,21
		Máxima	22,70	23,52	23,74	23,78	24,30
	2	Mínima	15,02	15,10	15,02	15,07	15,04
		Máxima	21,10	22,16	21,50	22,85	22,72
	N.º elementos		350311	429739	478457	621013	862750
	Acréscimo de elementos			23%	11%	30%	39%
7.2 - Inlet 18°C	1	Mínima	18,00	18,17	17,99	18,18	18,18
		Máxima	25,01	25,34	25,21	25,51	25,40
	2	Mínima	18,00	18,06	17,95	18,02	17,99
		Máxima	23,54	24,39	24,26	24,28	25,17
	N.º elementos		350311	429739	478457	621013	862750
	Acréscimo de elementos			23%	11%	30%	39%
7.3 - Inlet 24°C	1	Mínima	24,00	24,16	24,01	24,15	24,16
		Máxima	29,54	30,01	30,34	30,47	30,78
	2	Mínima	23,96	24,03	23,96	24,00	23,99
		Máxima	28,52	29,81	29,73	30,05	29,63
	N.º elementos		350311	429739	478457	621013	862750
	Acréscimo de elementos			23%	11%	30%	39%

## 8.5. Anexo E

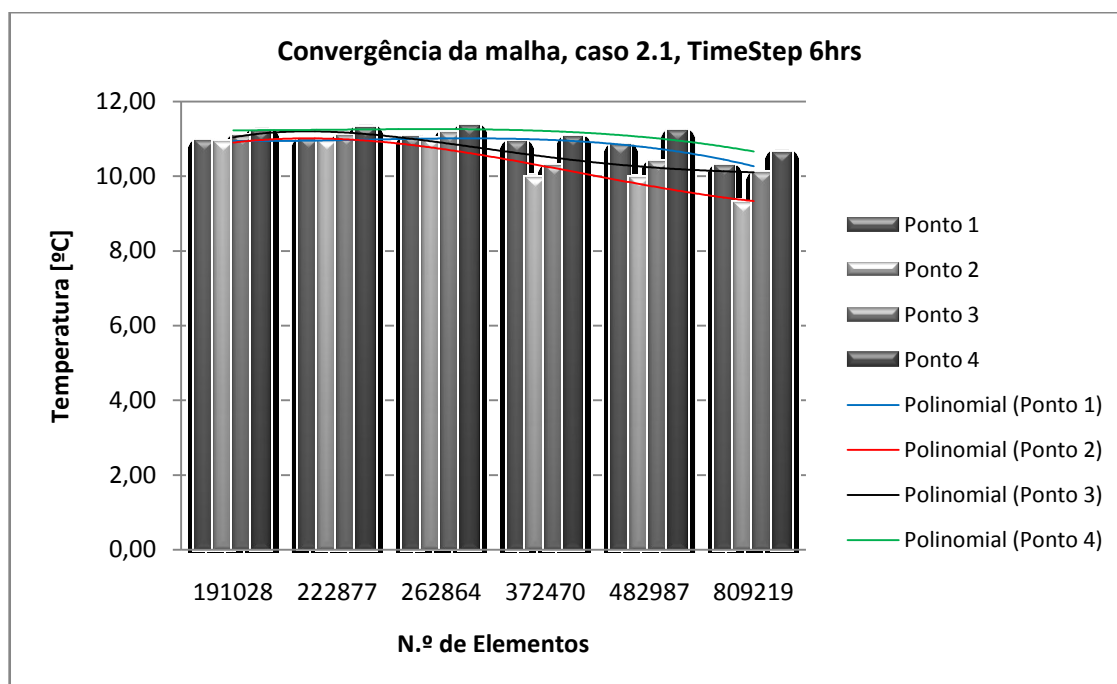


Gráfico 2 – Convergência da malha no estudo 2.1

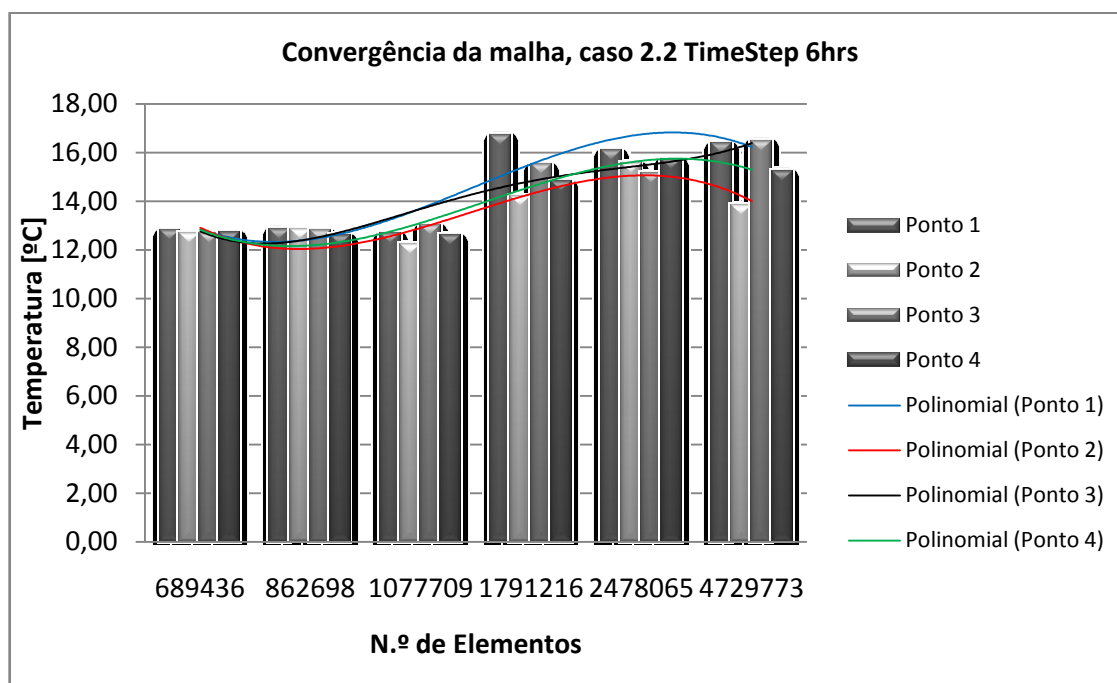


Gráfico 3 – Convergência da malha no estudo 2.2

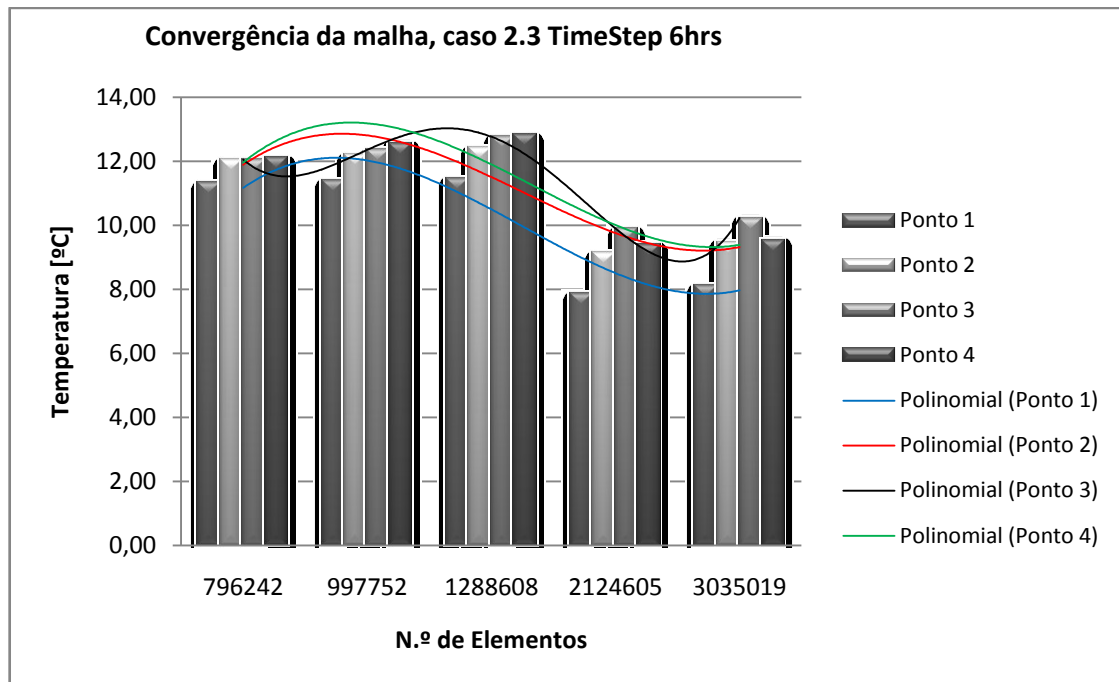


Gráfico 4 – Convergência da malha no estudo 2.3

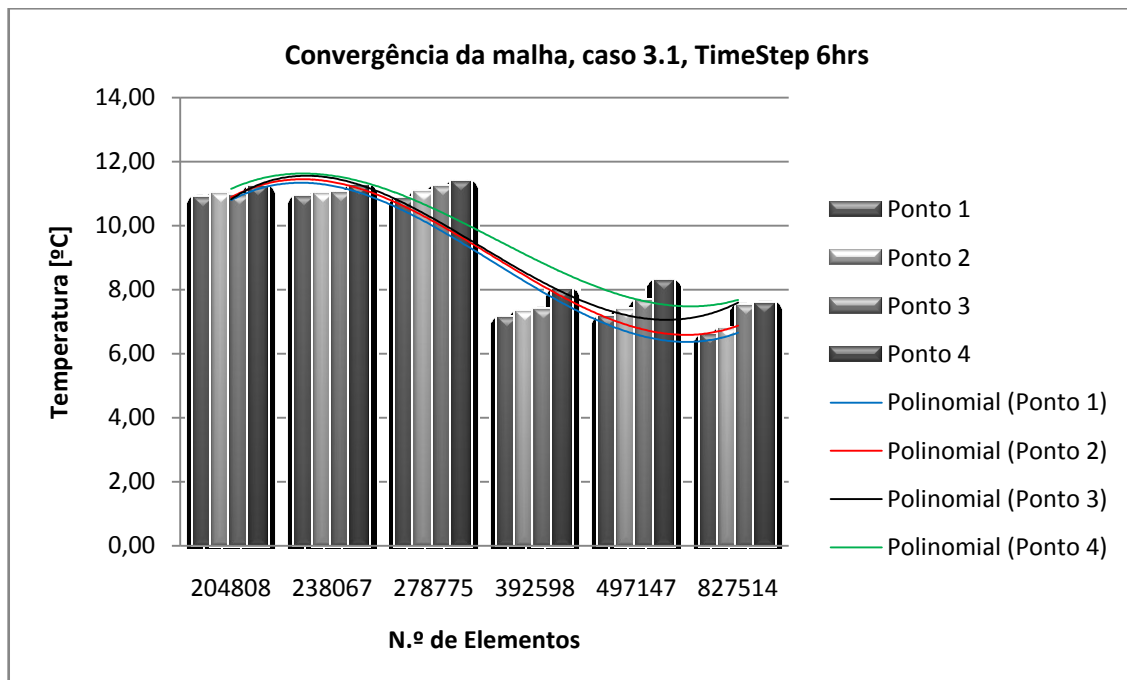


Gráfico 5 – Convergência da malha no estudo 3.1

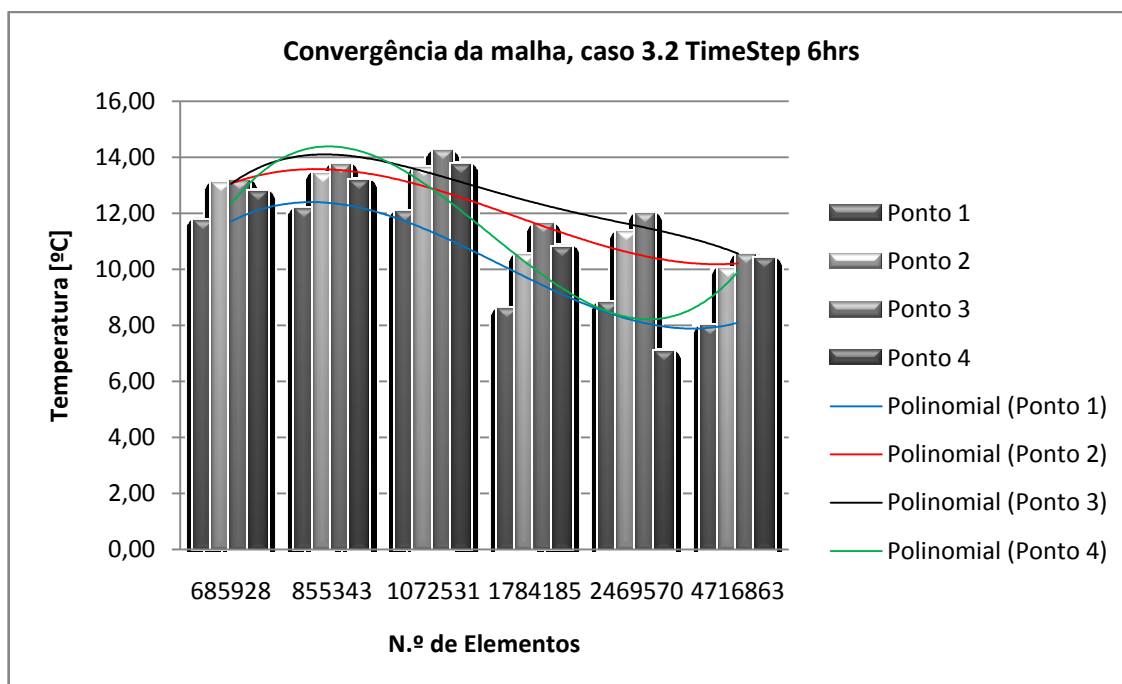


Gráfico 6 – Convergência da malha no estudo 3.2

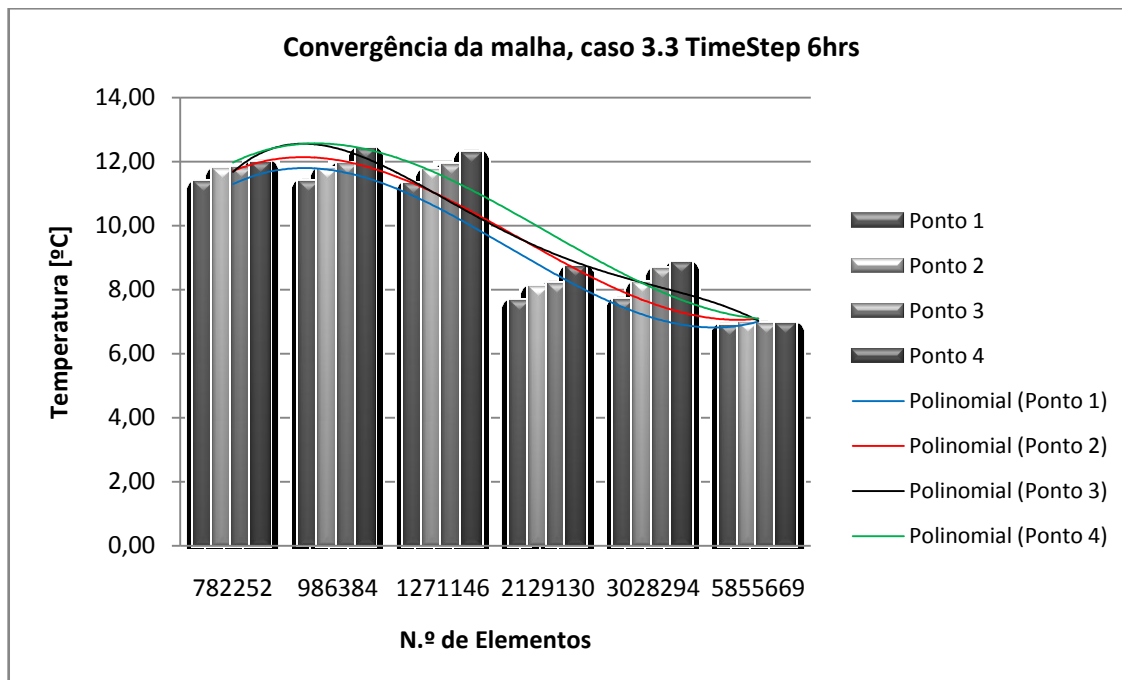


Gráfico 7 – Convergência da malha no estudo 3.3

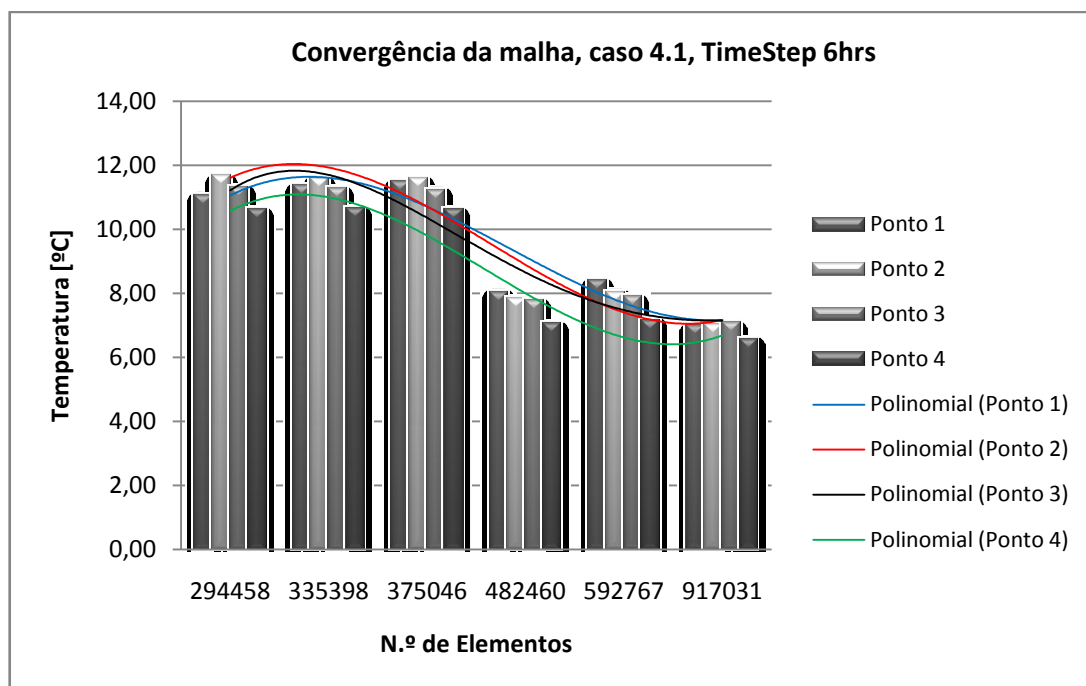


Gráfico 8 – Convergência da malha no estudo 4.1

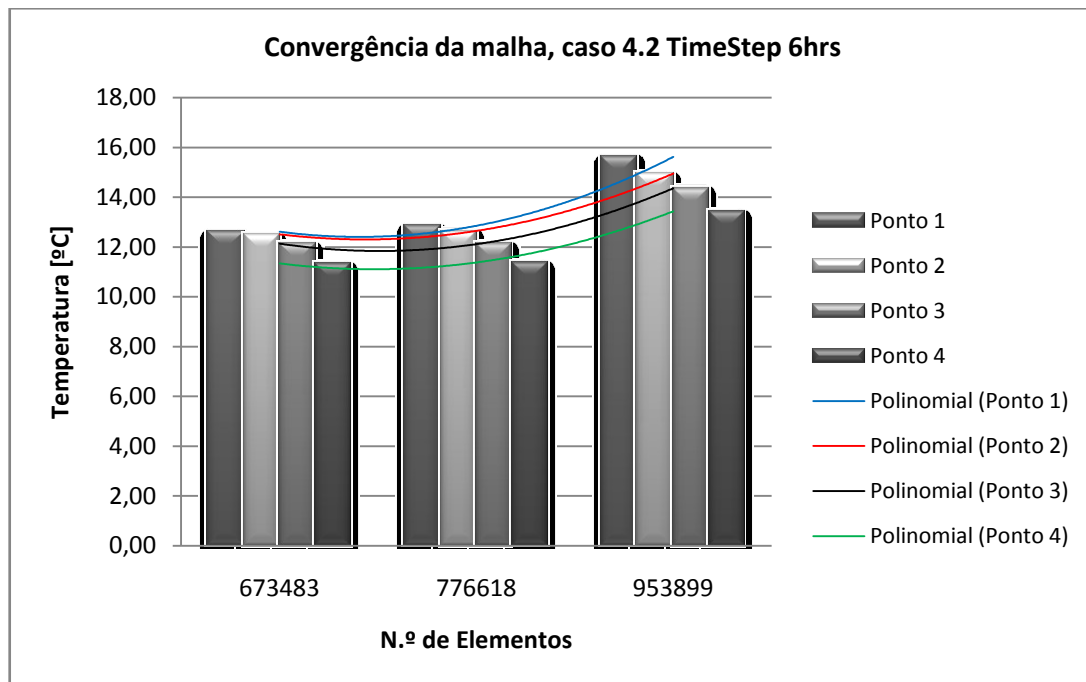
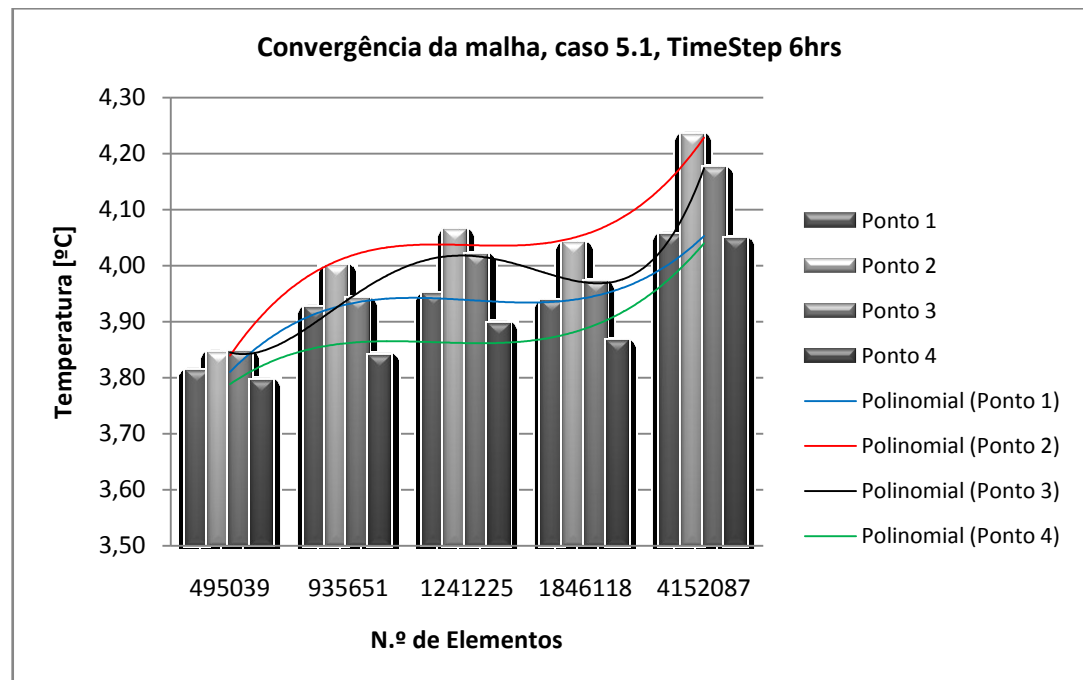
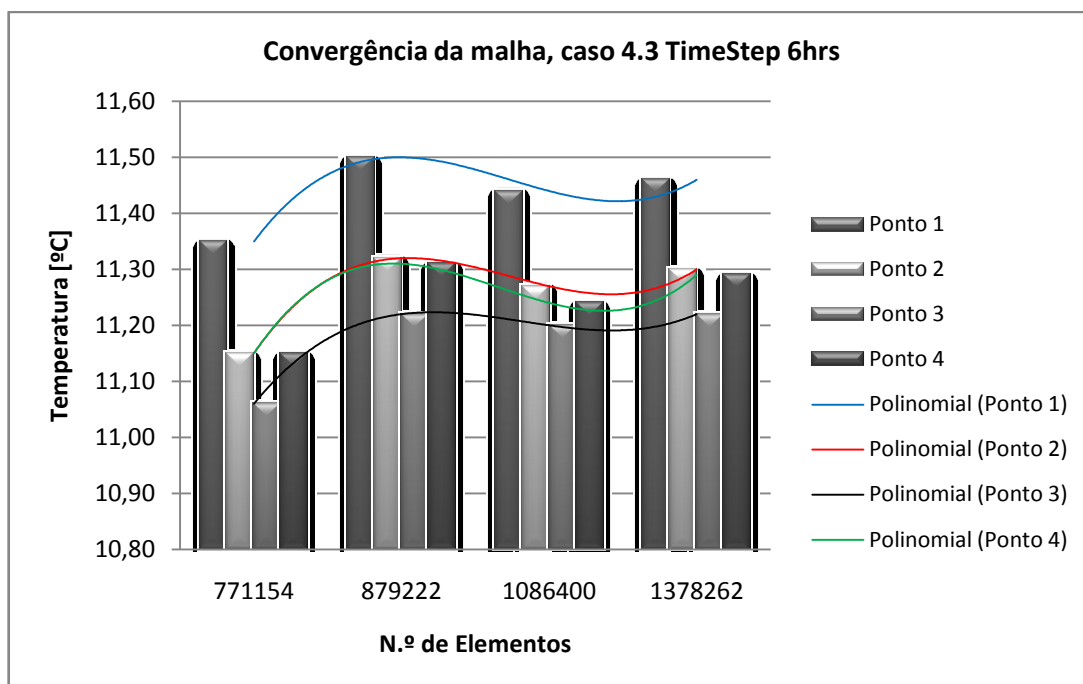


Gráfico 9 – Convergência da malha no estudo 4.2



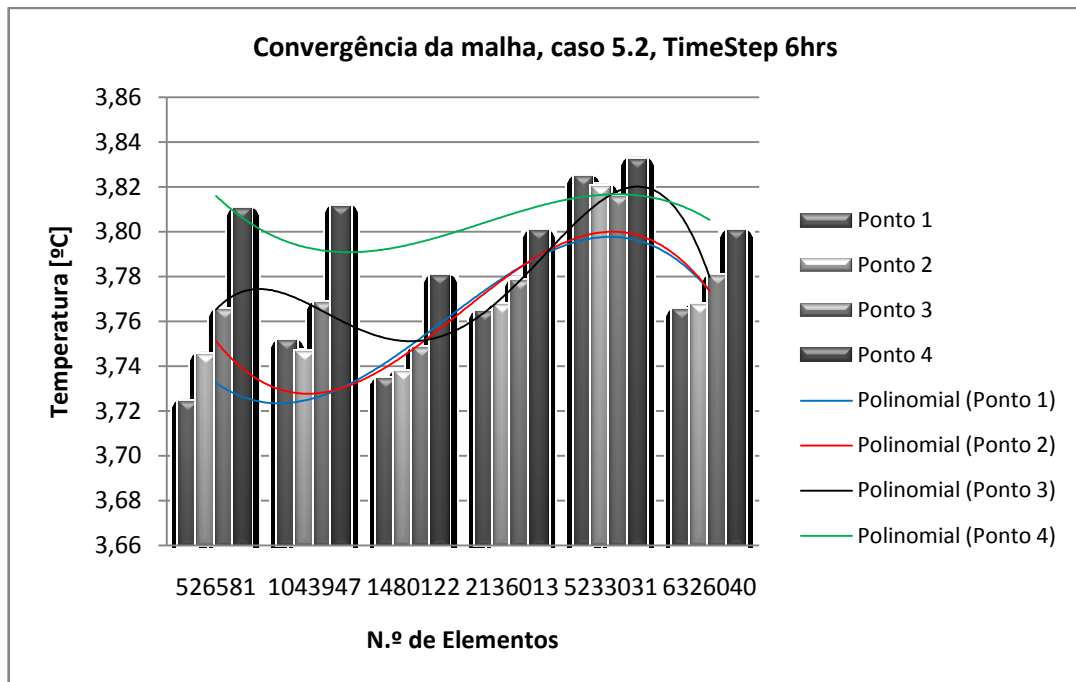


Gráfico 12 – Convergência da malha no estudo 5.2

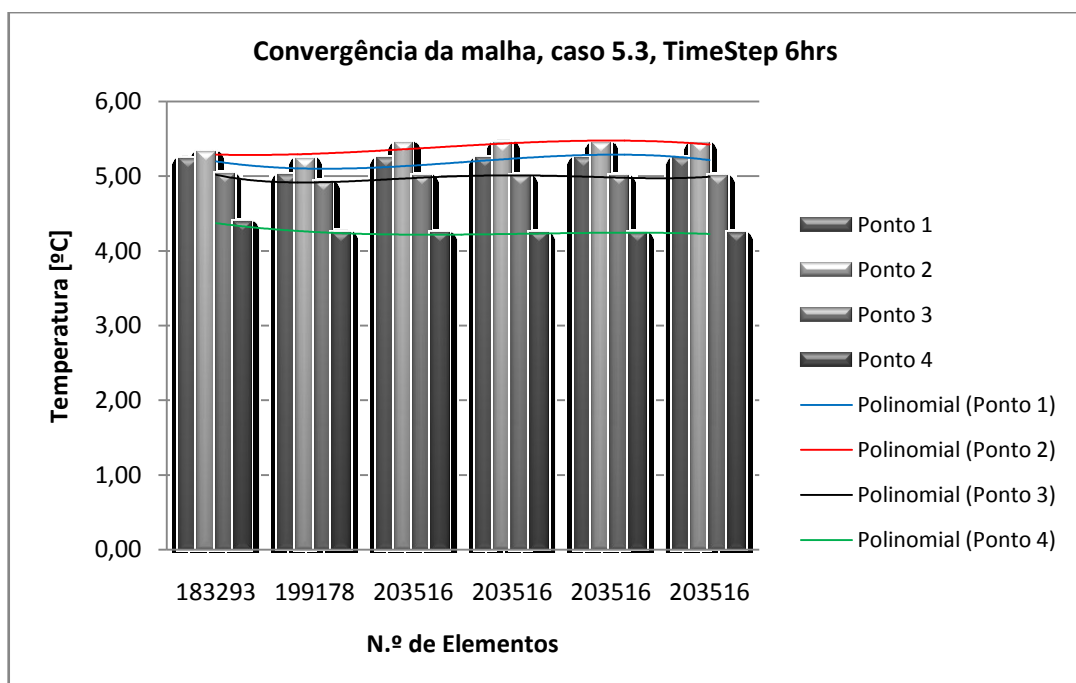


Gráfico 13 – Convergência da malha no estudo 5.3

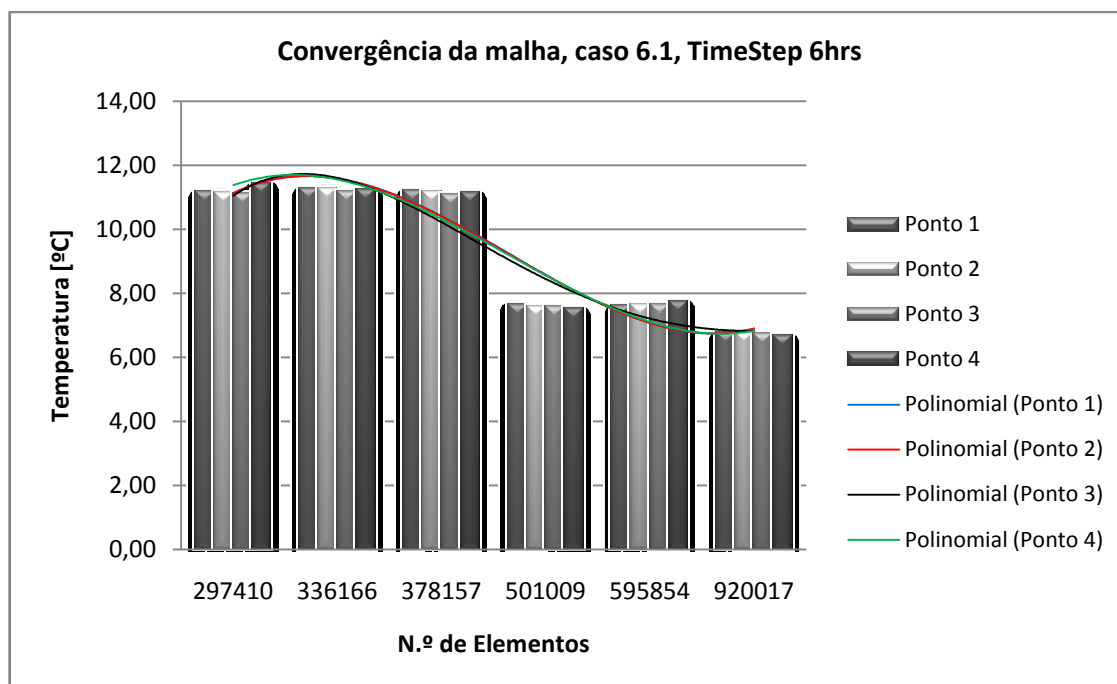


Gráfico 14 – Convergência da malha no estudo 6.1

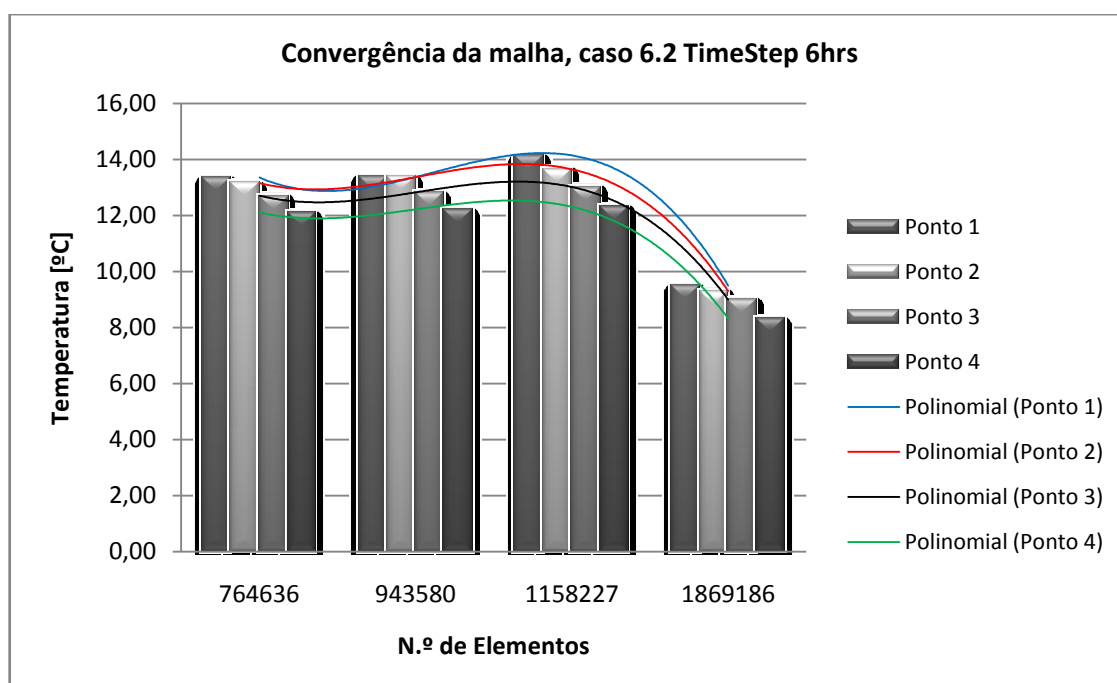


Gráfico 15 – Convergência da malha no estudo 6.2



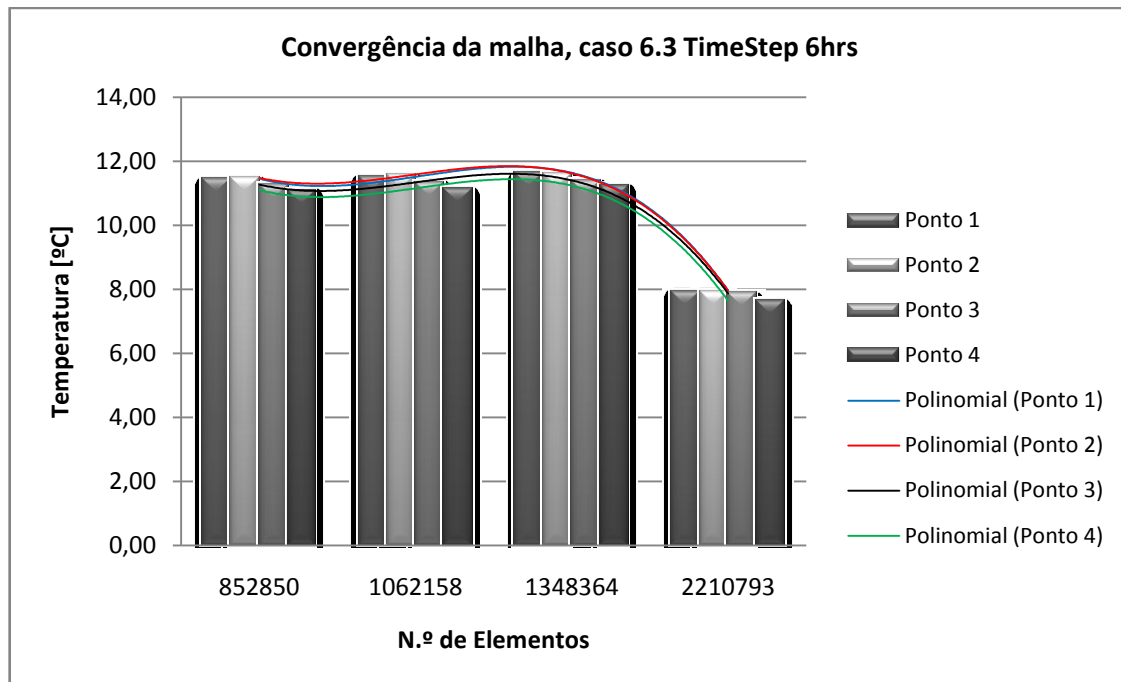


Gráfico 16 – Convergência da malha no estudo 6.3

8.6. Anexo F

